Astronomía Elemental

Volumen I: Astronomía Básica

Isaías Rojas Peña

Septiembre de 2013

Imagen de portada:

Es un montaje del grabado de Flammarion coloreado y la fotografía del espacio profundo del Telescopio Espacial Hubble © R. Williams (STScI), Hubble Deep Field Team y NASA. La idea original de este montaje es de Matthew Ota.

Editorial USM

Fono: +56 32 2654000, +56 32 2654106
Av. España 1680 Valparaíso, Chile.
www.editorial.usm.cl

ISBN Obra Completa: 978-956-332-535-5

ISBN Volumen II: 978-956-345-595-3

Diseño: Carolina Barrios Tubino & Adolfo Perez Saavedra.

Página web del libro: http://astronomia-elemental.blogspot.com/

Comentarios y sugerencias, escribir al autor a: *irojasp@gmail.com*

Presentación

Este texto es el resultado de muchas charlas y clases que he impartido, principalmente en la *Sociedad Astronómica de Valparaíso y Viña del Mar* (http://www.astrosaval.cl) y la *Associazione Ligure Astrofili Polaris* (http://www.astropolaris.it/) de Génova (Italia), además de los cursos básicos de astronomía que impartí entre los años 2000 y 2003 en el *Colegio Winterhill* y entre los años 2006 y 2009 en el campus de Viña del Mar de la *Universidad Nacional Andrés Bello*.

El texto intenta describir los principales descubrimientos astronómicos desde nuestro Sistema Solar hasta el Universo a gran escala. Para cumplir estos objetivos, el texto se divide en capítulos distribuidos en cuatro partes:

1. Introducción a la Astronomía

I. Astronomía Básica

2. Elementos de Astronomía Geocéntrica
3. Elementos de Mecánica Celeste

II. De las Estrellas al Origen de la Vida

4. Elementos de Astronomía Estelar
5. Astronomía Planetaria
6. Bioastronomía

III. El Universo

7. Astronomía Galáctica y Extragaláctica
8. Elementos de Gravitación y Cosmología

IV. Apéndices y Complementos

El *primer capítulo* pretende que el lector pueda adquirir nociones básicas de la ciencia de mayor desarrollo y potencialidad en Chile, para ello se revisa la visión científica de mundo y como la ciencia construye modelos que pretenden representar la naturaleza, posteriormente entrega una visión amplia de la astronomía moderna, sus áreas de estudio y como ésta se relaciona con las otras ciencias.

La *primera parte* se compone de dos capítulos. El *segundo capítulo* entrega los fundamentos de la astronomía geocéntrica, de forma que el lector pueda comprender como

los diversos fenómenos astronómicos influyen o han influido la vida cotidiana del ser humano. El *tercer capítulo* pretende entregar al lector los nuevos conocimentos adquiridos y desarrollados desde Copérnico hasta Newton.

La *segunda parte* se compone de tres capítulos, y el grado de complejidad es mayor que el de la primera parte. Para comprender los capítulos se requiere un lector con conocimientos de nivel de enseñanza secundaria, aunque los apéndices entregan de manera complementaria a los capítulos resúmenes de los conocimentos de base. El *cuarto capítulo* estudia las estrellas, comenzando por el Sol para continuar con formación estelar y el ciclo de vida de las estrellas. El *quinto capítulo* estudia los planetas y complementa la formación estelar analizando la teoría de formación planetaria, se estudia el sistema solar y los planetas extrasolares. El *sexto capítulo* intenta entregar una visión científica sobre el origen de la vida en la Tierra y la posible existencia de ella en otros lugares de nuestra galaxia.

La *tercera parte* se compone de dos capítulos. El *séptimo capítulo* estudia las galaxias, revisando su estructura, composición, morfología y las estructuras que ellas forman a gran escala. El *octavo capítulo* estudia la teoría de la gravitación de Einstein, y algunas de sus aplicaciones y/o consecuencias, por ejemplo la teoría de agujeros negros y las modernas teorías del origen y evolución del Universo.

La *cuarta parte* se compone de los apéndices, que son verdaderos complementos de los diversos capítulos, cuya finalidad es proveer de repasos de contenidos que son parte del curriculum de asignaturas científicas de la enseñanza media chilena. Si no se tiene una buena base de conocimientos secundarios de ciencias, resultará entonces fundamental revisarlos para el entendimiento del texto.

Por diversas razones la obra se ha dividido en tres volúmenes; el primero comprende al capítulo 1 y la primera parte: "Astronomía Básica" (capítulos 2 y 3), siendo este el nombre del volumen, el segundo volumen, denominado "Astrofísica y Astrobiología", comprende la segunda parte (capítulos 4 al 6) y el tercer volumen, denominado "El Universo", comprende la tercera parte.

Esta división ha permitido separar la astronomía básica de la astronomía básica-intermedia, refiriéndose al nivel de dificultad de los contenidos, siendo el primer volumen accesible a todo tipo de público, pudiendo incluso ser considerado como material de divulgación, el segundo y tercer volumen, aunque mantiene un nivel básico, cumple su objetivo educacional, por lo que requiere de un lector motivado (profesores, estudiantes, aficionados, autodidactas).

Isaías Rojas Peña.

Viña del Mar, noviembre de 2011.

Material Multimedia: Durante la lectura podrá apreciar en el margen lateral de algunos párrafos, la figura o ícono de una videocámara, esto significa que el tema que se está tratando en dicho párrafo dispone de vídeo(s) en la página web del libro (http://astronomia-elemental.blogspot.com/).

Prólogo del Primer Volumen

Es para mí un placer prologar este libro del profesor Isaías Rojas. La astronomía es una ciencia que todavía no termina de asentarse en el lenguaje de los chilenos a pesar de que los cielos de nuestro país presentan los más altos grados de transparencia tanto para longitudes de onda visibles como en ondas de radio. Es así como a las ya grandes instalaciones en los cerros del norte de Chile como Paranal, Tololo, La Silla, Las Campanas, etc., vienen ahora a sumarse telescopios de excelencia a nivel mundial tales como el E-ELT (European Extremely Large Telescope) que se instalará en Cerro Armazones, o el proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) en la planicie de Chajnantor considerado el lugar más seco del mundo para la radioastronomía. Con estas instalaciones nuestro país será una ventana de observación del universo absolutamente preferente haciendo que tenga aún más sentido el canto patrio que dice: "Puro, Chile, es tu cielo azulado…".

Creo que esta obra del profesor Rojas llena espacios vacíos en lo que a divulgación de la ciencia astronómica se refiere, quizás también, por qué no, despierte alguna temprana vocación por la ciencia del cielo en algún estudiante de Enseñanza Básica o Media. Felicito sinceramente a Isaías por su empeño y enorme voluntad para sacar adelante este primer libro de astronomía más allá de las inherentes dificultades propias de la tarea impuesta. Hay un proverbio chino que dice que si uno quiere sembrar para un año siembra arroz, si lo que se quiere es sembrar para diez años entonces debemos plantar árboles, pero si se quiere sembrar para cien años entonces sembramos en educación. Eduquemos entonces a nuestros estudiantes chilenos en aquella ciencia del cielo a la cual han contribuido tantos sabios desde la más remota antigüedad descifrando muchos de sus misterios. ¿Cuántos de ellos serán resueltos ahora desde el norte de Chile?. Esta apasionante aventura recién ha comenzado…

Luis Paredes R.

Dr. En Física

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a todos aquellos que han hecho posible la existencia de este texto, primero a mis estudiantes que tuvieron que soportar mis no siempre didácticas explicaciones. A sus preguntas, comentarios de clase, a sus discusiones de los foros on-line. Quisiera también agradecer a la Dra. (c) Lorena Zamora por su colaboración y entretenidas discusiones en la elaboración del apéndice B y a todas las personas que han contribuído en la revisión de las innumerables versiones preliminares, en particular en este volumen, al profesor Nicolás Porras de la Universidad Técnica Federico Santa María, al Dr. Luis Paredes ex presidente de la Sociedad Astronómica de Valparaíso y Viña del Mar y al Dr. Nikolaus Vogt, profesor de la Universidad de Valparaíso.

Quisiera también agradecer a todos aquellos que han autorizado el uso de sus fotografías o ilustraciones en este texto, en particular en este volumen: Guillermo Abramson, Juan Carlos Casado, Koen van Gorp, Stéphane Guisard, Marina Mucci, Matthew Ota, Ole P. Røervik, Johannes Schedler, Stefan Seip, Tunç Tezel, Agencia Espacial Europea (ESA), Hinode Science Center (NAOJ), Lunar Parallax Demonstration Project, Royal Society, Observatorio Europeo Austral (ESO), Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y 2dF QSO Redshift Survey.

Finalmente quisiera agradecer el apoyo del Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María, en particular de su Director el Dr. Olivier Espinosa y a la editorial USM, por haber confiado en mi, y haber hecho posible que este trabajo fuera publicado con el sello USM.



A mi familia, sin ellos esto nunca hubiera sido posible...

Dedicado al Profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María Dr. Olivier Espinosa (Q.E.P.D.), quien fuera mi profesor y a quien en parte debo agradecer el profesional en el que me he convertido y gracias a quien este libro ha podido ver la luz. Su pronta partida ha dejado un vacío no solo en la Universidad, sino que también en quienes tuvimos la suerte de ser sus alumnos y colaboradores.

Índice Temático

Capítulo 1

Introducción a la Astronomía

Objetivos

Objetivos Generales

- Comprender que es la astronomía y como a través de la ciencia, genera modelos que intentan explicar el funcionamiento del cosmos.

Objetivos Específicos

- Conocer que es la astronomía.
- Conocer como trabaja una ciencia, en particular la astronomía.
- Obtener una visión amplia de la astronomía moderna.

Contenidos

- Introducción.
- Visión Científica del Mundo.
- La Astronomía, Una Ciencia Observacional.
- Relación de la Astronomía con Otras Ciencias.
- Áreas de Estudio de la Astronomía.
- Astronomía no Óptica.

Introducción

El ser humano desde tiempos ancestrales ha observado el mundo que le rodea, pero a diferencia de los otros seres que habitan la Tierra, tuvo la capacidad de hacerse preguntas. Algunas de estas preguntas han encontrado respuestas, aunque otras, se mantienen en la actualidad. Un hecho curioso es que a medida que más se adquiere conocimiento, se comprueba que en realidad no se sabía nada y más aún, que falta mucho por descubrir e investigar.

Los primeros pasos en estos descubrimientos surgen luego que se instaura el sedentarismo, las primeras culturas se dedicaron, entre otras cosas, a estudiar el cielo y se dieron cuenta de la periodicidad de ciertos fenómenos y fueron capaces de asociar esta periodicidad a ciertas acciones que debían realizar (rituales, siembra y cosecha, etc.), y fueron asociando ciertas creencias, leyendas y mitos, a los fenómenos celestes, plasmando parte de su cultura en los cielos, representándolos a través de figuras formadas por grupos de estrellas en la esfera celeste, las llamadas *constelaciones*.

Es en este contexto que nace la que es posiblemente la más antigua de las ciencias. La Astronomía (del griego: $\alpha\sigma\tau\rho o\nu o\mu\acute{\iota}\alpha = \acute{\alpha}\sigma\tau\rho o\nu + \nu o\mu\acute{\iota}\alpha$ literalmente, ley de las estrellas), nace fusionada con todas estas historias mitológicas. Muchas veces esta influencia cultural mitológica, hizo alejarse las posibles explicaciones que daba a los fenómenos, la naciente ciencia. Además los descubrimientos que ciertos fenómenos terrestres son determinados por ciertos fenómenos celestes (eclipses de Luna, determinación del mediodía, los solsticios, los equinoccios, las estaciones, las mareas), produjo una extensión natural, que la posición de las estrellas y los planetas debían determinar también, el destino del hombre[1]. Posteriormente se producirá una separación natural, y a esta última se la llamó astrología. La ciencia astronómica, desde entonces, ha ido aumentando sus conocimientos y se ha separado totalmente de la astrología que, aunque descontextualizada, ha sobrevivido hasta nuestros días.

La *Astronomía es la* ***ciencia*** *que estudia cuanto se refiere a los astros o cuerpos celestes, principalmente las leyes de sus movimientos. Sin embargo, el estudio de como funcionan los astros, como y cuando se formaron, etc., es parte de la Astrofísica.* La Astrofísica es la parte de la astronomía que estudia las propiedades físicas de los cuerpos celestes, tales como luminosidad, tamaño, masa, temperatura y composición, así como su origen y evolución.

1.1. Visión Científica del Mundo

Nuestra presencia en el Universo nos convierte en observadores, pero ¿somos capaces de observar la realidad?

Sabemos del Universo, gracias a las señales que recibimos de él, por lo cual somos observadores de lo que el Universo nos permite que veamos; además la conciencia propia e individual de cada observador juega un rol muy importante para la interpretación de esas señales. Debido a que solo tenemos acceso a parte de la realidad, pues sabemos de ella gracias a las señales que percibimos, ésta resulta inalcanzable para nosotros. Cabe

[1]A modo de ejemplo, los caldeos adoptaron la astrología como parte fundamental de su forma de gobierno.

hacer notar que la influencia sociocultural también es importante en la interpretación de la realidad.

Existe entonces, una realidad que trasciende al ser humano, preexiste y es independiente a él[2], la que llamaremos simplemente "*realidad*". Por otra parte, existe otra distinta de esta realidad, que la llamaremos "*nuestra realidad*" que la construimos en nuestra mente de acuerdo a las señales recibidas y a nuestras interpretaciones.

$$Nuestra\ Realidad = Suma\ de\ todas\ las\ Señales + Nuestra\ Interpretación$$

Asignamos existencia a un objeto gracias a estas señales, claramente si no recibiéramos ninguna de estas señales, no sabríamos de la existencia de los objetos. Finalmente es en función de nuestra realidad que generamos *modelos, llamados* ***teorías científicas****, que tratan de representar esta realidad*, pero, como no tenemos acceso a ella, lo único que podemos afirmar es que describen nuestras observaciones, pero nunca que describen "la realidad". Así la ciencia nunca construye modelos de la "realidad".

1.2. La Astronomía, Una Ciencia Observacional

La ciencias naturales estudian la naturaleza a través de la observación y la experimentación. La astronomía a diferencia de la física, la química y la biología es una ciencia más bien *observacional* que experimental. Esto significa que el astrónomo a diferencia de otros científicos, no puede cambiar las condiciones físicas del sistema que observa o estudia. Está limitado a recibir la información de los cuerpos celestes, principalmente en forma de radiación electromagnética, y con ella y solo con ella, generar modelos que expliquen lo observado y lo no observado.

Un factor importante cuando se observa astronómicamente es el tiempo. La luz de los cuerpos celestes viaja por el espacio desde donde se origina hasta nosotros y eso requiere tiempo pues la luz viaja con velocidad finita, es decir, los objetos de estudio de la astronomía no se observan en "tiempo real", sino que en el momento en que la luz salió de ellos, incluso puede que la luz de un mismo objeto, como una galaxia, no haya salido toda al mismo tiempo, pues no todas sus estrellas están a la misma distancia de nosotros. Así estamos observando cuerpos celestes que pudieron haber desaparecido, por ejemplo, supongamos que el Sol se apagara en este momento. Como la luz del Sol tarda aproximadamente 8 minutos en viajar hasta la Tierra, no podríamos enterarnos de este acontecimiento hasta unos 8 minutos después de ocurrido.

Otro factor importante es la distancia. A escala humana la medida de distancia se realiza mediante el conteo de "trazos", en particular un trazo patrón llamado *metro*. Sin embargo, esto no tiene ningún sentido en astronomía.

Podemos inferir una distancia conociendo cuanto tarda la luz en viajar entre dos puntos, ya que ésta viaja en el vacío a una velocidad constante c independientemente de cualquier observador y si se está moviendo o no, o como se está moviendo (principio de la relatividad especial). Esto suele no ser entendido; pongámoslo a prueba: supongamos que usted viaja sobre un fotón (que viaja a c, aunque ningún cuerpo material puede viajar a velocidad c), ¿cuanto sería la velocidad que mediría de un fotón que va justo delante de usted en la misma dirección y sentido? (verifique su respuesta al final del capítulo).

[2]Esto es sólo desde una visión clásica del mundo, esto cambia radicalmente cuando estudiamos las reglas de la mecánica cuántica.

En física se suele usar como unidad de distancia el tiempo que tarda un fotón de luz en recorrer esa distancia, pues la luz (y cualquier onda electromagnética) viaja con velocidad constante por el vacío. Así por ejemplo, un año luz corresponde a la distancia que recorrería la luz en el vacío durante un año. Para conocer a cuanto equivale un año luz basta multiplicar el número de "años luz" por la velocidad de la luz en el vacío, veamos cuanto es este valor: 1 año tiene 365,25 días de 86.400 [s] y la velocidad de la luz en el vacío es $c = 299792458$ [m/s], luego:

$$299\,792\,458 \times 365{,}25 \times 86\,400 = 9{,}460\,7 \times 10^{15}\ [m]$$

esto es, 9.460 millones de millones (o billones) de metros o 9,4 millones de millones de kilómetros.

1.3. Relación de la Astronomía con Otras Ciencias

La *astronomía* es la ciencia que se dedica a estudiar los cuerpos celestes[3], principalmente las leyes de sus movimientos, su composición y evolución, utilizando para ello, el método científico[4].

1.3.1. Relación de la Astronomía con la Física

La física se relaciona con la astronomía dando las leyes que nos permiten entender los diferentes procesos que ocurren en el Universo. Ejemplo son las leyes del movimiento de los planetas y satélites (y otros cuerpos), el por que las estrellas brillan, etc.

Uno de los grandes triunfos de la ciencia del siglo XX fue construir dos grandes teorías que nos permiten comprender con gran detalle, en la mayoría de los casos, todos los fenómenos físicos asociados a los cuerpos celestes. Estas teorías son la *relatividad general* y *la mecánica cuántica.*

1.3.2. Relación de la Astronomía con la Química

Toda la materia está constituída de átomos, átomos que *fueron formados en el interior de las estrellas a partir del elemento más abundante del Universo*, el Hidrógeno, que fue formado a su vez luego del Big-Bang.

Los procesos que forman los átomos en el interior de las estrellas hacen que ellas emitan una gran cantidad de radiación y partículas ionizadas, estas partículas ionizadas al interactuar con átomos (presentes tanto en nebulosas, atmósferas o superficies de cuerpos celestes) producen radicales y otro tipo de reacciones. Por otra parte, si estas partículas interactúan con núcleos de átomos, los pueden convertir en otros elementos, aunque realmente estos procesos son físicos y no químicos.

Durante mucho tiempo se pensó que en el espacio interestelar no existían moléculas, sin embargo, desde hace unos 50 años, observaciones astronómicas han evidenciado

[3]Se llama cuerpos celestes a todos los que componen el Universo: estrellas, planetas, satélites, cometas, etc.

[4]El método científico, es una serie de procedimientos que permiten describir fenómenos de la naturaleza. En términos generales son: observación, razonamiento y experimentación. Ellos se utilizan para formular cualquier teoría científica.

la existencia de moléculas complejas. Se han encontrado moléculas orgánicas e incluso aminoácidos, que son los ladrillos fundamentales de la vida.

1.3.3. Relación de la Astronomía con la Biología

El estudio de la vida y su evolución nos ha explicado como ésta se ha adaptado a las diferentes etapas que ha pasado nuestro mundo, sin embargo, en la actualidad no conocemos como se originó la vida, a pesar de que existen vagas ideas. Si pudiéramos encontrar este eslabón podríamos entonces conocer en que otros lugares del Universo se puede también originar la vida.

1.4. Áreas de Estudio de la Astronomía

La astronomía trata de investigar cuanto se refiere a los componentes de nuestro Universo para ello se divide principalmente en:

1. Astronomía Planetaria
2. Astronomía Estelar
3. Astronomía Galáctica y Extragaláctica
4. Cosmología
5. Bioastronomía

1.4.1. Astronomía Planetaria

El estudio de la formación y evolución de los diferentes planetas (gaseosos y rocosos), es el principal interés de esta rama de la astronomía.

El conocimiento de los planetas del sistema solar nos permite generar modelos de planetas extrasolares, es decir, planetas que orbitan en torno de otras estrellas.

Se han descubierto planetas orbitando estrellas moribundas (Púlsares) y planetas gigantes gaseosos en órbitas muy próximas a sus estrellas huéspedes, lo cual hace cuestionar los actuales modelos de formación planetaria. En el caso del sistema solar existen evidencias que indican que la *teoría nebular* es la que mejor explica la formación planetaria (pero sólo en el Sistema Solar). Además se han descubierto grandes planetas (tipo Júpiter) en las cercanías de algunas estrellas.

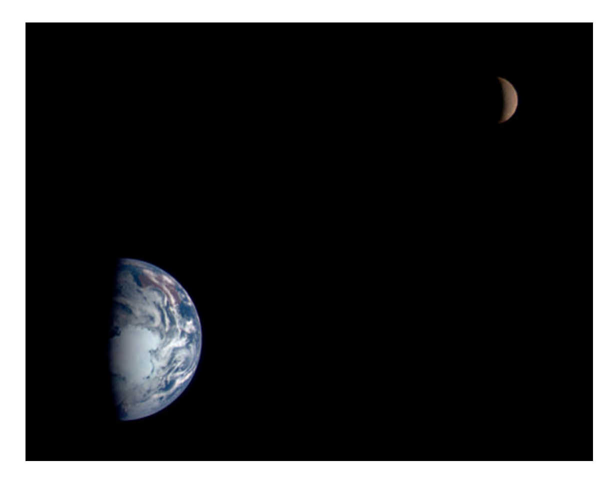


Figura 1.1: Una vista de nuestro planeta La Tierra y su satélite natural La Luna. Un buen parámetro para comenzar a estudiar planetas es comenzar por estudiar el nuestro. Créditos: NEAR Spacecraft Team, JHUAPL, NASA



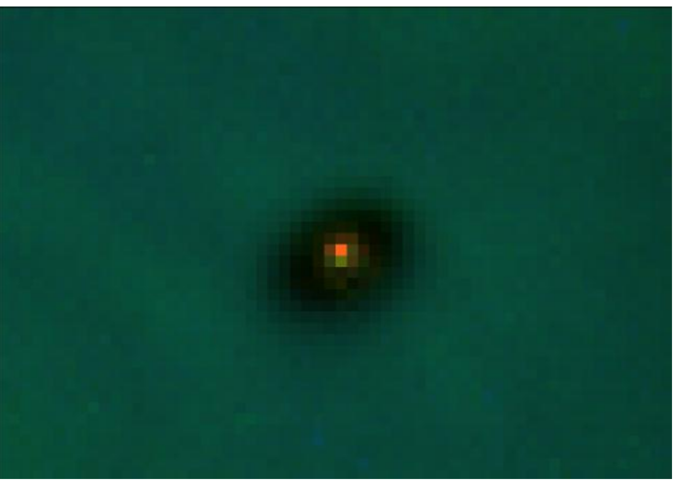


Figura 1.2: (Izquierda) Júpiter es un buen modelo para el estudio de planetas extrasolares, ya que en la actualidad se detectan principalmente “planetas tipo Júpiter”. Este planeta es el más grande del sistema solar, teniendo su propio mini sistema formado por varias decenas de satélites. Créditos: John Spencer (Lowell Observatory), NASA.

Figura 1.3: (Derecha) Imagen tomada por el telescopio espacial Hubble de una estrella muy joven en la Nebulosa de Orión. Se encuentra rodeada de material sobrante de la formación estelar, llamado disco protoplanetario. Créditos: Mark McCaughrean (Max-Planck-Institute for Astronomy), C. Robert O’Dell (Rice University), NASA.

1.4.2. Astronomía Estelar

Se preocupa de estudiar el nacimiento, evolución y muerte de las estrellas. El estudio del Sol como una estrella modelo nos permite saber como pueden ser otras estrellas, hacer comparaciones y generar modelos que nos permitan saber si todas las estrellas evolucionan de la misma manera.

Una de las cosas interesantes es estudiar la etapa final de evolución de las estrellas para poder responder preguntas como ¿cuánto tiempo de existencia le queda al Sol? ¿cómo va a terminar su vida el Sol?, cuando esto suceda ¿existirá la Tierra?.

La importancia que tienen algunas fases que pasan algunas estrellas como las Supernovas, los Púlsares y las Cefeidas realimentan modelos cosmológicos.

Las observaciones del telescopio espacial Hubble, han evidenciado maternidades estelares, como también Estrellas de Neutrones, Enanas Marrones o Café, y candidatos a Agujeros Negros. Estos últimos fueron predichos por la teoría de la relatividad general.

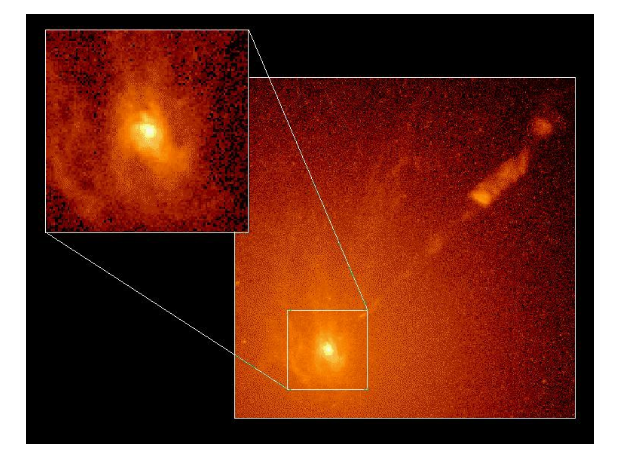


Figura 1.4: Imagen del telescopio espacial Hubble del centro de la galaxia M87. Se puede observar un potente chorro (jet) de materia eyectada por los poderosos campos magnéticos y un disco de gas que es la posible evidencia de un agujero negro supermasivo. Estrellas con masas mayores a 8 masas solares pueden terminar sus días como agujero negro, el intenso campo gravitacional debido a su gran masa contraída a un punto material llamado singularidad. Dentro del agujero, ninguna partícula material, ni siquiera la luz, puede escapar. Créditos al final del capítulo.

1.4.3. Astronomía Galáctica y Extragaláctica

Se preocupa de estudiar la formación, morfología y evolución de las galaxias. Las galaxias son agrupaciones de estrellas, están compuestas por miles de millones de estrellas, todas ellas interactuando gravitacionalmente, manteniéndose unidas y junto con el polvo interestelar dan origen a las morfologías observadas.

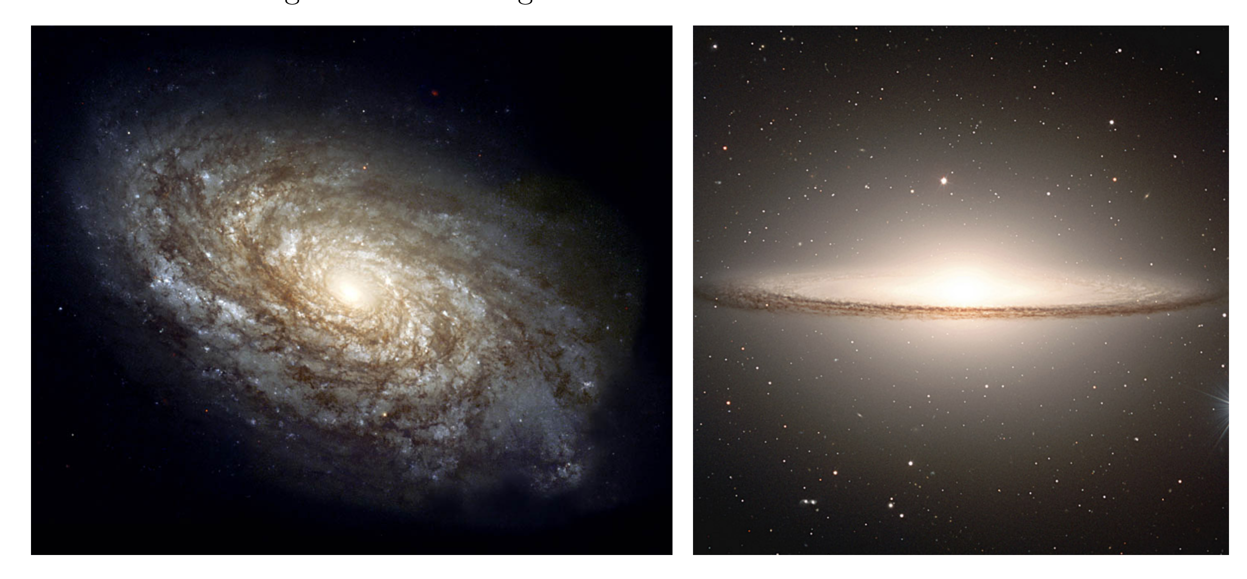


Figura 1.5: (Izquierda) La galaxia espiral NGC 4414. A través de estrellas que varian su luminosidad, se determina la distancia de las galaxias, en este caso 19,1 megaparsecs, lo que equivale a 60 millones de años-luz. Créditos: NASA Headquarters - GReatest Images of NASA (NASA-HQ-GRIN).

Figura 1.6: (Derecha) La galaxia espiral Sombrero, se observa un anillo oscuro, que se debe a polvo, que absorbe la luz proveniente de ella. Créditos: NASA y The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

Las galaxias se encuentran interactuando gravitacionalmente con sus vecinas, y forman conglomerados de decenas de componentes denominados "*grupos*", por ejemplo nuestra galaxia la "*Vía Láctea*" forma parte del "*grupo local*", a su vez, los grupos forman "*cúmulos*" de galaxias de unas centenas de componentes y los cúmulos forman "*supercúmulos*" con millones de componentes.

A gran escala, los supercúmulos se están agrupando de forma tal que forman estructuras filamentarias dejando entre 90 y el 95 % de espacio "vacío". Los vacíos son burbujas "huecas" entre los filamentos cuyos tamaños son 75 a 150 millones de años-luz de diámetro, y los filamentos están compuestos de vastas cadenas de supercúmulos (ver Figura 1.7).

1.4.4. Cosmología

La cosmología se preocupa de estudiar el origen, evolución y futuro del Universo.

El Universo está compuesto principalmente por materia (galaxias y materia oscura[5]) y radiación (ondas electromagnéticas y las aún no observadas ondas gravitacionales).

La materia observada en el Universo está contenida en una gran cantidad de galaxias, (app. 5×10^{11}), estas son, sus componentes básicas. Los cosmólogos construyen modelos

[5] La materia oscura, es la que se evidencia por sus efectos gravitacionales pero que no es observable debido a que no emite radiación.

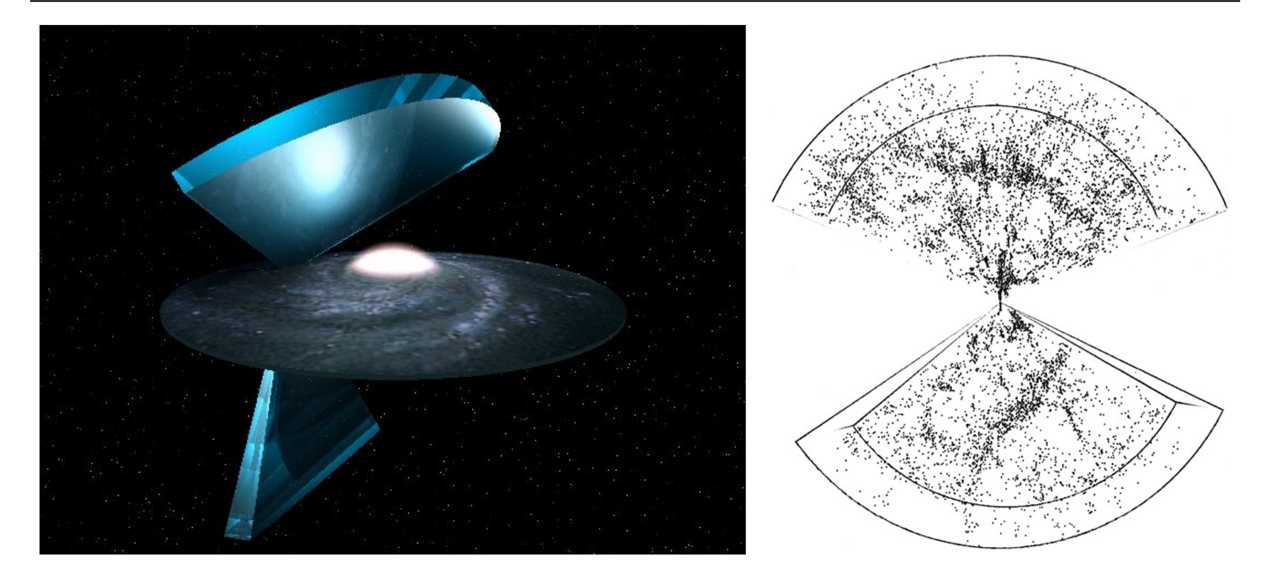


Figura 1.7: Desde nuestro planeta (en uno de los brazos espirales de nuestra galaxia) se ha observado la distribución de supercúmulos a gran escala en dos regiones una del hemisferio norte y otra del hemisferio sur galáctico (izquierda). Las observaciones mostraron (derecha) que los cúmulos y supercúmulos forman estructuras largas y filamentarias. En esta representación el eje radial del abanico representa el corrimiento hacia el rojo, esto es, mientras más alejado de la Tierra más lejano y más antiguo es el objeto observado. Créditos: The 2dF QSO Redshift Survey.

del Universo considerándolas como masas puntuales, más bien, un gas extremadamente diluído (gas ideal) cuyas partículas son justamente las galaxias, las que solo ocupan una millonésima parte (10^{-6}) del volumen del Universo.

El Universo está constantemente en expansión. Este fenómeno fue descubierto por el astrónomo *Edwin Hubble* en 1929. Sus observaciones astronómicas indicaban un corrimiento hacia el rojo (ver Apéndice D), lo cual Hubble interpretó como efecto Doppler concluyendo que este está en expansión.

La teoría del origen del Universo, nacida desde el seno de la teoría de la relavidad general, se conoce como *teoría del Big-Bang* y respecto al destino del Universo, esta predice tres posibilidades:

1. El Universo se expande por siempre.

2. El Universo se expande y luego se detiene la expansión.

3. El Universo se expande y luego se contrae (Big-Crunch).

El destino del Universo está intimamente relacionado con su geometría:

1. Si el Universo se expande por siempre, su curvatura es nula, por lo cual su geometría es plana, al igual que la de un plano elástico. En esta geometría, la euclidiana, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es de 180° (figura 1.8, Izquierda).

2. Si el Universo se expande y luego se detiene, su curvatura es positiva al igual que la de la superficie de una esfera elástica. En esta geometría no euclidiana, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es mayor que 180° (figura 1.8, Centro).

3. Si el Universo se expande y luego se contrae, su curvatura es negativa al igual que la de una silla de montar. En esta geometría no euclideana, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es menor a 180° (figura 1.8, Derecha).

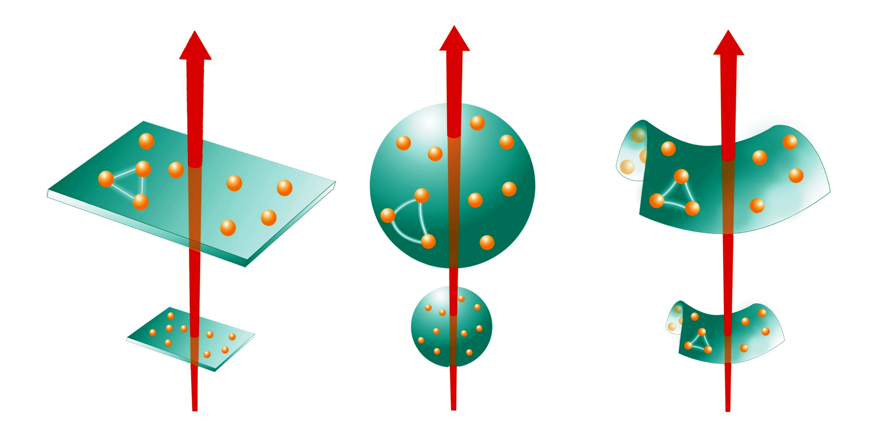


Figura 1.8: La superficie de estas figuras poseen geometría plana (izquierda), con curvatura positiva (centro) y con curvatura negativa (derecha). El Universo (con más dimensiones) también posee estas tres posibles geometrías. Dicha geometría está íntimamente relacionada con el destino del Universo. Las flechas representan la expansión del Universo.

1.4.5. Bioastronomía

Es el estudio de la vida en algún otro lugar del Universo. Para ello debemos saber de que manera se originó y desarrolló la vida en la Tierra, por lo cual se reúne el conocimiento de muchas otras ciencias como la Microbiología, Química Orgánica, Física, Geología, Mineralogía.

Sin duda, uno de los descubrimientos más importantes del siglo XX fue el conocer la estructura del ADN y la forma como esta molécula es capaz no sólo de autorreplicarse sino también llevar la información genética necesaria para crear células u organismos similares a sus progenitores. Una de las investigaciones más importantes es la de tratar de averiguar como algunas moléculas fueron capaces de agruparse, evolucionar y llegar a formar lo que llamamos vida.

Debido a las propiedades tan extraordinarias de la materia viviente, podríamos suponer que los elementos que la componen son diferentes, pero la materia viviente está formada por los mismos elementos del mundo inorgánico, *átomos que fueron formados en las estrellas.*

Gracias a la Radioastronomía, se ha descubierto que la Química orgánica no está ausente en el espacio. Los procesos del espacio interestelar son capaces de producir una gran cantidad de moléculas complejas. Las mezclas orgánicas requeridas para construir seres vivientes se encuentran en el espacio, prueba de ello son las rocas que caen del espacio. El análisis de los meteoritos nos da una gran cantidad de información sobre la química extraterrestre.

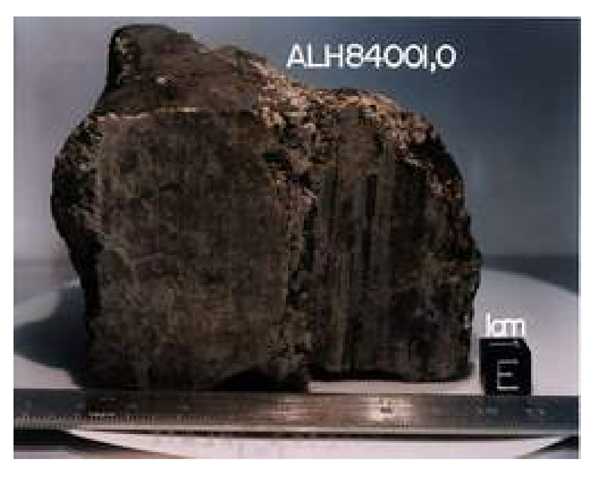


Figura 1.9: ALH84001, es un meteorito de origen marciano. En 1996 se descubrió evidencias de la posible existencia de vida en un pasado remoto de nuestro vecino planeta. Créditos: NASA.

El conocimiento adquirido a través del estudio de los extremófilos (organismos que viven en ambientes extremos) nos permite soñar con encontrar vida en lugares muy cercanos a la Tierra como Marte, el cuarto planeta desde el Sol y Europa, un satélite de Júpiter.

1.5. Astronomía no Óptica

Los telescopios no solamente son construidos en el rango de longitudes de onda de la luz[6], dado que hay mucha información que es imposible obtenerla en estas longitudes de onda. El problema es que nuestra atmósfera no es transparente para todas las longitudes de onda, debido a que los distintos gases que la componen absorben radiación. En la figura 1.10 se ha representado la longitud de onda versus la absorción atmosférica, se observa que la absorción es cero para la ondas de radio y muy baja para el rango de longitudes de onda del visible y por el contrario la absorción es del 100 % para los rayos gamma, rayos X, ultravioleta y onda larga. Esto significa que sobre la superficie de la Tierra solo se pueden construir telescopios que aprovechen estas "ventanas" donde la absorción es cero o muy cercana a cero, y para aquellas longitudes de onda donde la absorción es muy alta solo se puede observar sobre la atmósfera, ya sea con globos, satélites o telescopios espaciales.

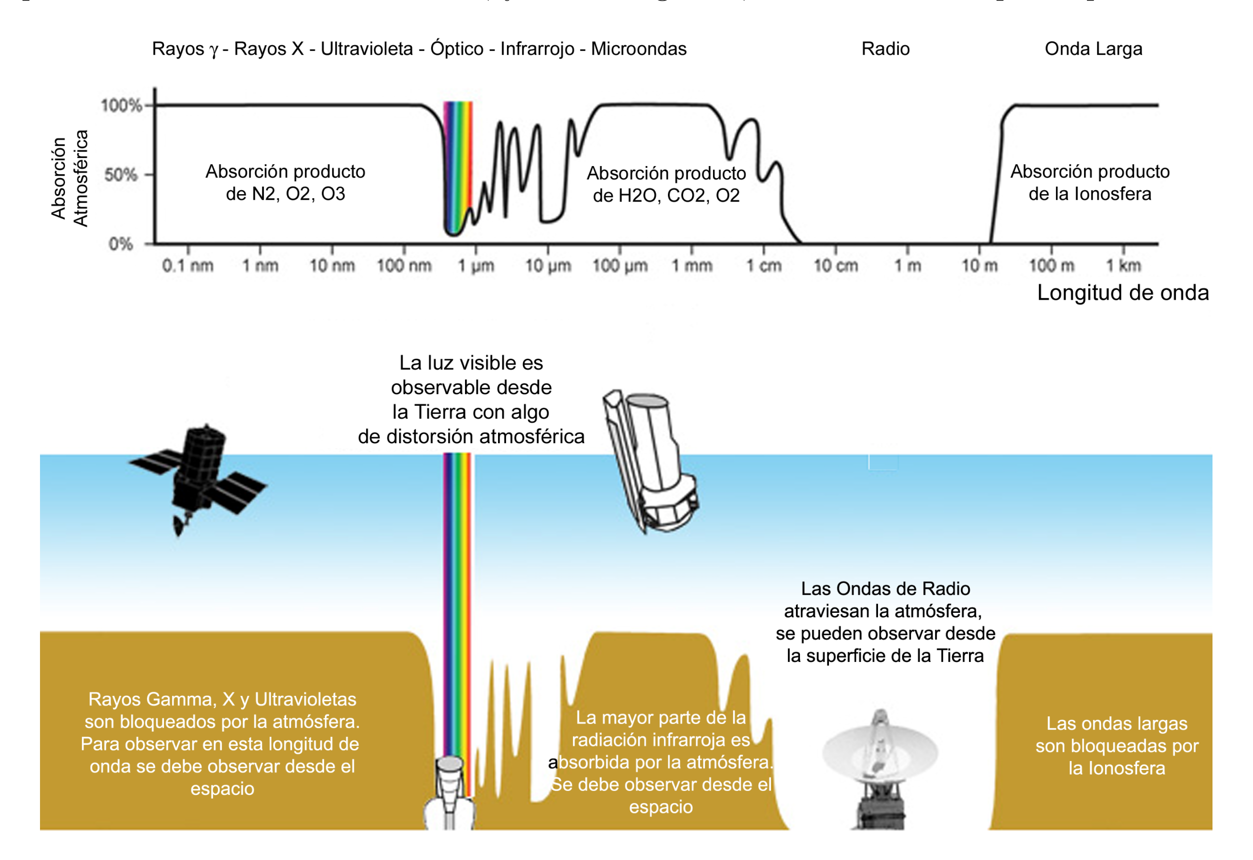


Figura 1.10: La imagen muestra la opacidad atmosférica para diferentes longitudes de onda, se aprecian dos ventanas principales a nivel del mar, la ventana óptica y la ventana del radio, sin embargo, existen otras ventanas a alturas mayores. Créditos: NASA/IPAC.

Justamente la visión humana y de muchos otros animales evolucionó para captar la radiación electromagnética proveniente del Sol que es capaz de atravezar la atmósfera,

[6] Las longitudes de onda visibles por el ojo humano están en el rango de 400 a 800 nanómetros.

así la visión utiliza la ventana óptica para observar, de hecho los ojos son los primeros detectores que utilizó el ser humano para hacer observaciones astronómicas.

1.5.1. Radioastronomía

Estudia el Universo en las longitudes de onda del espectro electromagnético llamadas de radio. Para poder recibir las ondas de radio de las profundidades del espacio, se utilizan antenas, llamadas radiotelescopios, que funcionan de forma similar a un telescopio reflector.



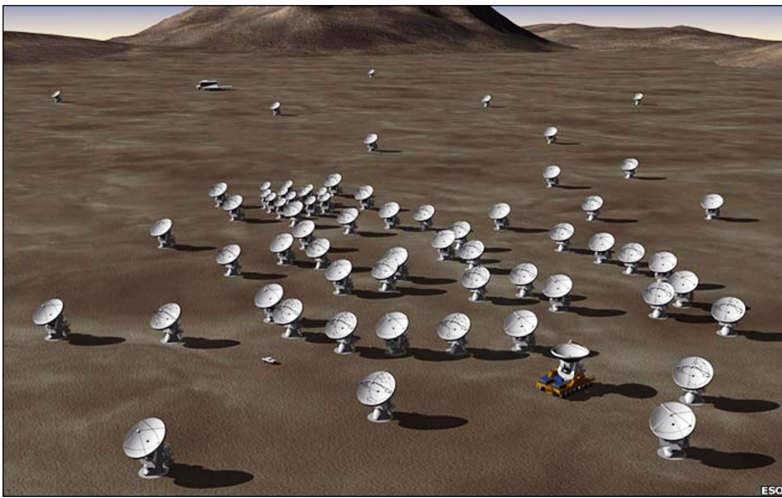


Figura 1.11: (Izquierda) El radiotelescopio de Arecibo, actualmente es el radiotelescopio más grande del mundo, se encuentra en Puerto Rico. Cortesía de NAIC - Arecibo Observatory, una instalación de la NSF.

Figura 1.12: (Derecha) El Proyecto ALMA (acrónimo del inglés Gran Conjunto de Radiotelescopios de Atacama), construye el radiotelescopio más grande del mundo, el cual poseerá 66 antenas en el Llano de Chajnantor, al norte de San Pedro de Atacama, Chile. Créditos: ESO.

La radioastronomía investiga, por ejemplo, la radiación cósmica de fondo, la cual es la evidencia más clara de la teoría del Big-Bang. Se utiliza también para descubrir de que átomos y moléculas están compuestos: estrellas, planetas, nubes moleculares, etc. Los radiotelescopios son también como grandes oídos que buscan en todo el cielo posibles mensajes enviados por otras civilizaciones. Esta misión la tiene asignada el Instituto Seti. De la misma forma, en 1974, se envió desde el radiotelescopio de Arecibo, información sobre la cultura terrestre y el sistema solar en dirección del gran cúmulo de Hércules.

La astronomía de radio al igual que la óptica posee observatorios terrestres, debido a que la atmósfera es transparente en estas longitudes de onda.

1.5.2. Astronomía Infrarroja

Estudia principalmente el Universo más frío, ya que los cuerpos más fríos radian en estas longitudes de onda. Para ello se utilizan detectores especiales de radiación infrarroja[7]. Debido a que el vapor de agua, no es transparente para la radiación infrarroja, los observatorios de infrarrojos deben construirse en lugares altos y secos o fuera de la atmósfera.

[7] La radiación infrarroja tiene longitudes de onda mayores que la longitud de onda del rojo.

1.5.3. Astronomía de Altas Energías

Estudia el Universo muy caliente. Incluye la astronomía de rayos X, astronomía de rayos gamma y astronomía ultravioleta, así como el estudio de los neutrinos y los rayos cósmicos.

Exceptuando el caso de los neutrinos y los rayos gamma de muy altas energías, las observaciones se pueden hacer únicamente desde globos aerostáticos u observatorios espaciales.

Los detectores de neutrinos se suelen situar a gran profundidad para evitar detectar otras partículas. Pero como no es posible detectar los neutrinos directamente, se utilizan depósitos de agua pesada para que los neutrinos al impactar contra un electrón le transfieran parte de su movimiento. En algunas ocasiones el electrón alcanza una velocidad que supera la de la luz en ese medio acuoso, produciendo la emisión de luz característica, conocida como *radiación de Cherenkov*, y es esta radiación la que se detecta. Para el caso de rayos gamma de muy alta energía se detectan indirectamente con telescopios Cherenkov que utilizan la atmósfera como medio de detección: el rayo gamma de muy alta energía produce una *cascada atmosférica* de partículas y fotones, el telescopio registra la imagen del breve destello de radiación Cherenkov producida por la cascada.

1.6. Bibliografía del Capítulo

- *Astronomía, Una ventana al conocimiento*. H. Quintana. Pontificia Universidad Católica de Chile, Colección Teleduc. 1992.
    - Desarrollo Científico y Visión del Mundo.
- *Física, Feynman. Volumen I, Mecánica, Radiación y Calor*. R. Feynman, R. Leighton y M. Sands. Addison-Wesley Iberoamerica. 1987.
    - Capítulo 3: La Relación de la Física con Otras Ciencias.

Créditos imagen 1.4: Holland Ford, Space Telescope Science Institute/John Hopkins University; Richard Harms, Applied Research Corp.; Zlatan Tsvetanov, Arthur Davidsen, y Gerard Kriss de Johns Hopkins; Ralph Bohlin y George Hartig del Space Telescope Science Institute; Linda Dressel y Ajay K. Kochhar de Applied Research Corp. de Landover, Md.; y Bruce Margon de la University of Washington, Seattle. NASA.

Respuesta a la pregunta planteada en la sección 1.2: En el experimento hipotético que un observador viajara sobre un fotón, según el principio de relatividad especial, vería alejarse un fotón a la velocidad de la luz, independientemente que el mismo se esté moviendo a la velocidad de la luz.

Parte I

Astronomía Básica

Capítulo 2

Elementos de Astronomía Geocéntrica



Objetivos

Objetivos Generales

- Identificar diferentes tipos de cuerpos que componen la esfera celeste.

Objetivos Específicos

- Identificar cuerpos celestes y constelaciones del cielo nocturno.
- Conocer los movimientos de estrellas, planetas, la Luna y el Sol sobre la esfera celeste.
- Comprender las razones de las fases lunares, estaciones, eclipses y tránsitos planetarios.

Contenidos

- La Esfera Celeste
- Constelaciones
- Movimientos de la Esfera Celeste
- Movimiento del Sol
- Movimiento de la Luna
- Movimientos de los Planetas
- La Tierra
- Tránsitos Planetarios
- Ocultaciones
- Eclipses
- Las Estaciones del Año

Introducción

En este capítulo haremos una descripción astronómica del mundo desde el punto de vista geocéntrico, gran parte de lo que estudiaremos en este capítulo es parte de la astronomía descriptiva o *cosmografía* (del griego $\kappa o\sigma\mu o\gamma\rho\alpha\varphi\iota\alpha$) y parte de la *astronomía de posición*. Esta última tiene por objeto situar en la esfera celeste[1] la posición de los astros midiendo ciertos ángulos respecto de determinados planos fundamentales, su nombre está referido a una de sus funciones más importantes, la determinación de la hora y las coordenadas geográficas, útiles principalmente para la navegación.

Casi todos los fenómenos pueden ser explicados sin necesidad del modelo heliocéntrico, de hecho, cuando se hace astronomía observacional se realiza desde un punto de vista geocéntrico. Usando este modelo describiremos el movimiento de planetas, el movimiento diurno y anual del Sol y las estrellas, fenómenos como los eclipses y las estaciones, y de forma suplementaria usaremos el modelo heliocéntrico para el estudio de las estaciones.



Figura 2.1: En una noche oscura es posible fotografiar el movimiento de la esfera celeste dejando el obturador de una cámara fotográfica abierto por varias horas. Se registrarán sobre el elemento sensible (película o CCD) "trazos" estelares. En la fotografía se observa el polo sur celeste desde el observatorio de cerro Paranal. Fotografía gentileza y copyright de Stéphane Guisard.

[1]Celeste, del Latín cælestis, que significa perteneciente al cielo.

2.1. La Esfera Celeste

Durante una noche despejada y relativamente oscura, podemos observar que las estrellas parecen desplazarse lentamente a través del cielo (figura 2.1). Supondremos, que las estrellas se encuentran fijas en una esfera imaginaria que denominamos la "*esfera o bóveda celeste*", y supondremos además, que es ésta, la que se mueve en torno a la Tierra (*modelo geocéntrico*), dando cuenta así del movimiento de las estrellas.

Un observador sobre la superficie de la Tierra solo puede ver una parte de la esfera celeste, la que se encuentra sobre el horizonte, pero gracias al movimiento de ella, denominado *rotación sideral*, durante la noche se puede ver gran parte de la esfera celeste.

Debido a la rotación sideral, la mayoría de las estrellas descienden bajo el horizonte, por el Sudoeste y salen por el Sudeste para el caso del hemisferio Sur. Para el caso del hemisferio Norte las estrellas se ponen por el Noroeste y salen por el Noreste. Si no estamos observando en latitudes ecuatoriales, también podemos observar que algunas estrellas nunca descienden bajo el horizonte, las llamadas *estrellas circumpolares*, sus trazos forman círculos completos alrededor de un punto en el cielo llamado "*polo celeste*" (figura 2.1), en cada hemisferio solo puede ser observado uno[2], el polo Sur celeste para observadores del hemisferio Sur y el polo Norte celeste para observadores del hemisferio Norte. En el caso del hemisferio Norte, existe una estrella localizada casi en el polo celeste, *Polaris* (la estrella polar). Debido a esto su posición parece estacionaria durante la noche. En el caso del hemisferio Sur no hay estrellas brillantes en las cercanías del polo Sur celeste.



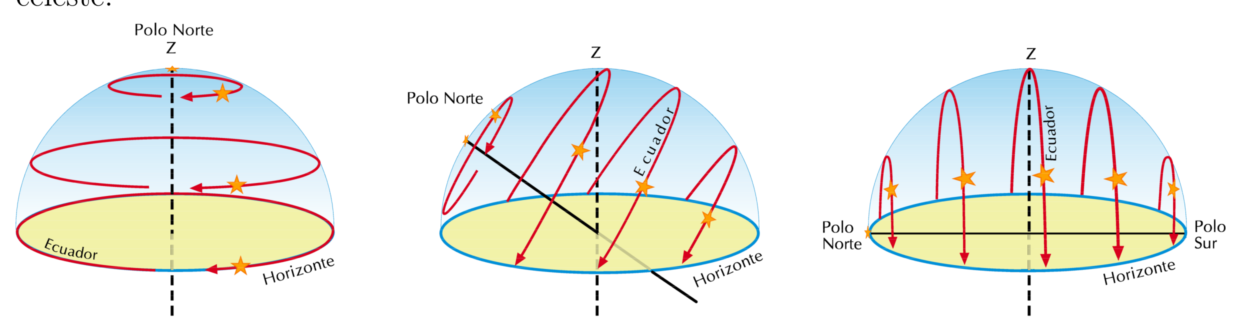


Figura 2.2: Un observador polar ve sobre en el Cenit (Z) el Polo celeste (izquierda), un observador ecuatorial ve ambos polos sobre el horizonte y el Ecuador celeste pasa por su Cenit (derecha), un observador en una latitud distinta a las anteriores ve el Polo celeste sobre el horizonte con un ángulo igual a su latitud (centro).

Se establece sobre la esfera celeste un sistema de coordenadas, el cual, es una extensión del sistema de coordenadas terrestres, el sistema ecuatorial (figura 2.3), de esta forma tenemos un "*ecuador celeste*", las líneas meridianas o de latitud, son llamadas *declinación (Dec)* y las líneas paralelas o de longitud son llamadas *ascensión recta (RA)*. La declinación es medida en grados (°), minutos[3] de arco (′) y segundos de arco ("), sobre o debajo del ecuador celeste. Debido a que toma aproximadamente un día para que una estrella reaparezca en el mismo punto en el cielo, se mide la ascensión recta en horas, minutos y segundos. Finalmente llamamos "*meridiano celeste*" a la línea imaginaria Norte-Sur que

[2]Excepto un observador ecuatorial, él puede observar ambos polos justo en el horizonte en posiciones diametralmente opuestas y las estrellas circumpolares descienden todas bajo el horizonte.

[3]Un minuto de arco es la sesentava parte de un grado. A su vez la sesentava parte de un minuto de arco es denominado segundo de arco.

cruza el cielo a través del cenit[4]. Así, por ejemplo, las estrellas cerca del polo Norte celeste tienen declinaciones cercanas a +90°, y las estrellas cercanas al polo Sur celeste tienen declinaciones cercanas a -90°.

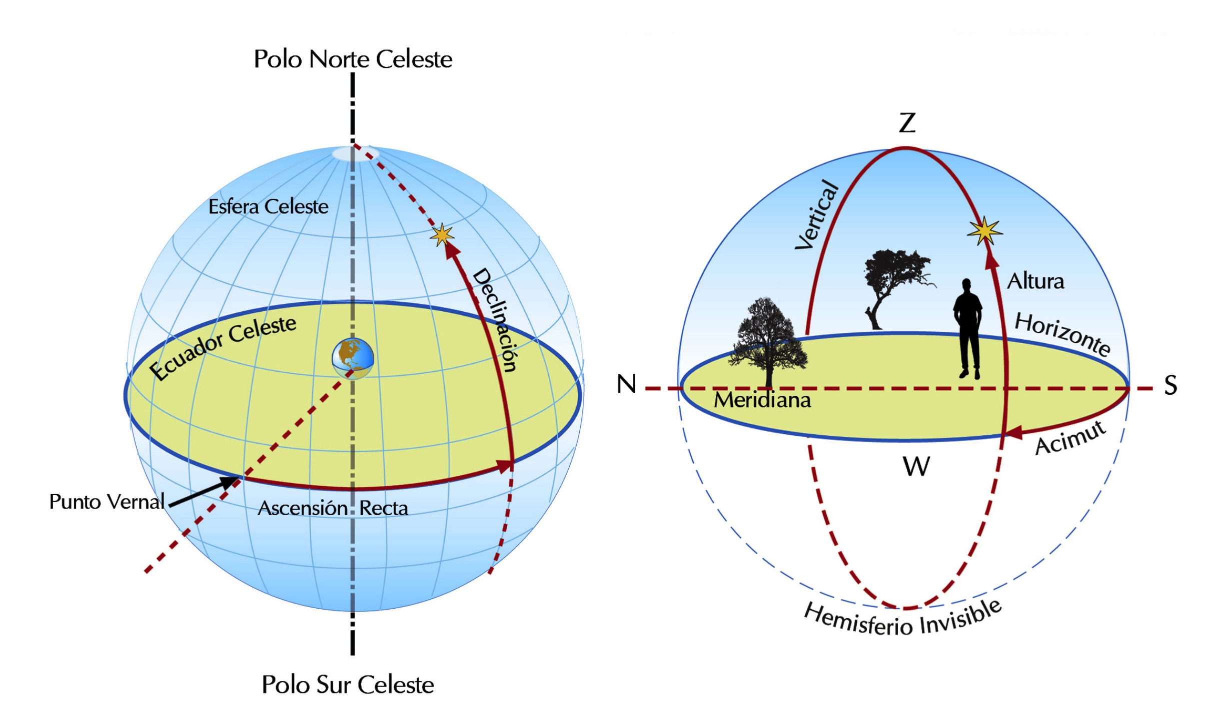


Figura 2.3: (Izquierda) La Esfera Celeste es la esfera imaginaria donde las estrellas se encuentran fijas. La imagen muestra los polos, el ecuador y las coordenadas horarias.

Figura 2.4: (Derecha) Coordenadas horizontales, la imagen muestra el horizonte, el ecuador, los polos y el cenit (Z).

Otro sistema de coordenadas usado es el *horizontal* que utiliza valores locales (figura 2.4) que dependen de la ubicación geográfica de cada observador (horizonte y altura sobre el horizonte). Este sistema de coordenadas utiliza dos coordenadas, la *altura (Al)* y el *acimut (Az)*. El acimut (Del árabe Assumūt, que significa camino, dirección o punto del horizonte que se extiende hasta el cenit) es el ángulo, sobre el horizonte, que se forma entre el meridiano del lugar, medido desde el sur y hacia el Oeste, y la línea que pasa por el cenit y el astro en cuestión. La altura se mide desde el horizonte (0°) hasta el cenit (90°), así la altura es el ángulo que forma el objeto observado con el horizonte. Si el objeto se encuentra por debajo del horizonte su altura es negativa.

2.2. Constelaciones

Las estrellas parecen puntos luminosos que poseen diferentes intensidades y colores, ubicadas en la bóveda o esfera celeste y que pueden ser vistas en el cielo nocturno. Siendo parte de la naturaleza humana la identificación de patrones, como formas de animales, vegetales o de diversos objetos, tanto en formaciones rocosas, tectónicas, nubes, etc., no es raro que las antiguas civilizaciones hayan agrupado, de la misma forma, las estrellas que

[4] *Cenit* es el punto de la esfera celeste justo sobre la cabeza del observador. De forma opuesta, *Nadir* es el punto de la esfera celeste justo bajo los pies.

parecen estar juntas en el cielo[5]. Estos patrones son llamados "*constelaciones*" y en ellas plasmaron seres y objetos, tanto mitológicos como de aspectos cotidianos de sus vidas, ejemplo de ello son los objetos relacionados con el mar y la navegación, presente tanto en las constelaciones de la antigüedad como en las nuevas constelaciones del hemisferio Sur, nombradas así después de la época de descubrimientos, debido a la importancia práctica que tienen para la orientación geográfica.

En la actualidad las constelaciones son útiles tanto para la navegación como para identificar regiones del cielo. Nuestro moderno sistema de 88 constelaciones (Apéndice B) está parcialmente basado en constelaciones que fueron identificadas por las antiguas culturas de Mesopotamia, Babilonia, Egipto y Grecia, y parcialmente en constelaciones agregadas en los cielos del Sur y en regiones de los cielos del Norte previamente ignoradas debido a que no contenían estrellas brillantes. Finalmente es importante indicar que los nombres de las constelaciones están en Latín.

Hiparco de Nicea (∼190 - 120 a. de C.) hacia el año 129 a. de C. elaboró un catálogo estelar donde establece la posición de cerca de 850 estrellas brillantes. Tenemos conocimiento de este trabajo gracias al "*Sintaxis Mathematica*" más conocido como *Almagesto*, de *Claudio Ptolomeo* (90 - 168 d. de C.). Ptolomeo amplió el catálogo de Hiparco, dejando registro de la posición de 1.022 estrellas, que dividió, tal como lo hiciera Hiparco, en seis grandes grupos de acuerdo a su brillo aparente.

Al primer grupo pertenecen las estrellas más luminosas, al segundo grupo aquellas un poco más débiles, hasta el sexto grupo al cual pertenecen aquellas más débiles, visibles en una noche sin Luna, para una persona con vista perfecta (¡y sin luces de ciudad!).

Diferencia de Magnitud	Razón de Brillo
0,0	1:1
0,5	1,6:1
1,0	2,5:1
1,5	4:1
2,0	6,3:1
3,0	16:1
6,0	251:1
15	1.000.000:1
20	100.000.000:1

Tabla 2.1: Tabla que muestra la razón de brillo entre dos estrellas en función de la diferencia de magnitud aparente.

Para designar las estrellas de una constelación se usa la nomenclatura introducida por *Johann Bayer* (1572 - 1625) en su atlas estelar *Uranometria*, publicado en 1603. Las estrellas, son denominadas con una letra del alfabeto griego en minúscula, siguiendo en orden decreciente de brillo aparente que tienen dentro de la constelación, junto al genitivo en latín del nombre de la constelación a la cual pertenece, así, por ejemplo $\alpha - Centauri$, corresponde a la estrella más brillante de la constelación del Centauro. Aunque en varios casos esto no se cumple a cabalidad, pues a modo de ejemplo $\beta - Orionis$ es la estrella más brillante de la constelación de Orión.

α : alfa	β : beta	γ : gamma	δ : delta	ϵ : epsilon	ζ : dseta
η : eta	θ : theta	ι : iota	κ : kappa	λ : lambda	μ : mu
ν : nu	ξ : xi (ksi)	o : omicron	π : pi	ρ : rho	σ : sigma
τ : tau	υ : ypsilon	ϕ : phi (fi)	χ : jí (chi)	ψ : psi	ω : omega

Tabla 2.2: Letras griegas minúsculas.

[5]Estas estrellas, en general no tienen ninguna relación entre sí, de hecho, ni siquiera se encuentran cerca realmente, que parezcan cercanas es netamente circunstancial.

2.2.1. Constelaciones Zodiacales

Las constelaciones zodiacales (zodiaco del griego $\zeta\acute{\omega}\delta\iota\acute{o}\varsigma$ diminutivo de $\zeta\tilde{\omega}o\nu$: ser vivo, animal y $\acute{o}\delta\acute{o}\varsigma$: camino) son aquellas constelaciones a través de las cuales el Sol pasa durante el año, es decir, las que se encuentran en la línea de la eclíptica.

En la actualidad (año 2008), el Sol transita por 13 de las 88 constelaciones, durante las siguientes fechas:

1. Capricornus (la cabra con cuerpo de pez) entre el 19 de enero y el 18 de febrero.
2. Aquarius (el aguador) entre el 18 de febrero y el 13 de marzo.
3. Pisces (los peces) entre el 13 de marzo y el 20 de abril.
4. Aries (el carnero) entre el 20 de abril y el 13 de mayo.
5. Taurus (el toro) entre el 13 de mayo y el 21 de junio.
6. Gemini (los gemelos) entre el 21 de junio y el 20 de julio.
7. Cancri (el cangrejo) entre el 20 de julio y el 10 de agosto.
8. Leo (el león) entre el 10 de agosto y el 16 de septiembre.
9. Virgo (la virgen) entre el 16 de septiembre y el 30 de octubre.
10. Libra (la balanza) entre el 30 de octubre y el 22 de noviembre.
11. Scorpius (el escorpión) entre el 22 de noviembre y el 29 de noviembre.
12. Ophiuchus (el serpentario) entre el 29 de noviembre y el 17 de diciembre.
13. Sagittarius (el arquero) entre el 17 de diciembre y el 19 de enero.

Usted ya se habrá dado cuenta que las fechas de tránsito y el número de constelaciones no coinciden con la de los famosos "Horóscopos" que son confeccionados por los astrólogos. Esto se debe a dos razones:

1. El zodíaco fue originariamente establecido por los Babilonios cerca del 2000 a. de C. y la elección de 12 constelaciones se debe posiblemente a que el año trópico contiene cerca de 12,4 meses lunares. Así, cuando a mediados del siglo II d. de C. Claudio Ptolomeo sistematizó la astronomía antigua, las constelaciones zodiacales eran solo 12, y la constelación Ophiuchus no era parte del zodiaco. En la actualidad debido a la "*precesión de los equinoccios*", que revisaremos más adelante, el Sol pasa por Ophiuchus en su movimiento por la bóveda celeste, por lo mismo las fechas correspondientes a cada constelación zodiacal no son las mismas que las fechas comúnmente dadas para los "signos". La precesión de los equinoccios era conocida por Ptolomeo, sin embargo, todo parece indicar que no lo es por los "modernos" astrólogos.

2. Hasta hace muy poco no existía un límite claro entre una constelación y otra, razón por la cual una misma estrella podría pertenecer a más de una constelación. Debido a esto la Unión Astronómica Internacional acordó en 1928 los nombres oficiales de las constelaciones y estableció los límites de las constelaciones a través de líneas imaginarias que siguen arcos de meridianos y de paralelos celestes.

Observación 2.2.1 *En el lenguaje cotidiano cuando el Sol transita por una constelación en su movimiento a través de la esfera celeste, se dice simplemente que el Sol está en dicha constelación. Obviamente en este período la constelación no es visible, pues se encuentra detrás del Sol y por ende es de día. Los antiguos astrónomos pudieron establecer las fechas en las cuales el Sol transitaba por cada constelación zodiacal posiblemente registrando al atardecer cuando ella baja en el horizonte justo después del Sol, y cuando al amanecer ésta sube en el horizonte justo antes de que el Sol lo haga.*

2.2.2. Mitos y Constelaciones

La asociación entre mitos y constelaciones se remonta a los albores mismos de la civilización. Los primeros registros de ellas se han encontrado en tablillas de arcilla Mesopotámicas, datadas hacia el 1700 a. de C., en ellas se registran: la Osa mayor, las Pléyades y tres estrellas aisladas.

Hacia el 1100 a. de C. los asirios confeccionaron las *tablas de Mul.Apin*. En escritura cuneiforme registran largas listas de las posiciones y movimientos de las estrellas de más de 30 constelaciones. Posiblemente fueron confeccionadas para ser usadas como calendario, convirtiéndose con el tiempo en un almanaque, sirviendo a propósitos cotidianos como siembra y cosecha, además de fines religiosos.

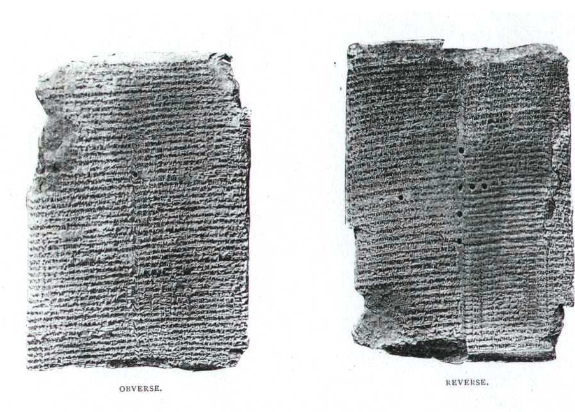


Figura 2.5: Una de las tablas de Mul.Apin (por ambos lados) en escritura cuneiforme contiene observaciones asirias de las posiciones relativas de las constelaciones. Actualmente se encuentran en el British Museum de Londres.

Estas constelaciones habrían sido asimiladas por el mundo helénico. 20 de ellas se mantuvieron “idénticas” y otras 10 habrían sido adaptadas. Pero los antiguos griegos tomaron también algunas ideas de los egipcios, no pasó mucho tiempo desde *Tales de Mileto* (639 a. de C. - 568 a. de C.) para que los antiguos griegos empezaran a reconocer figuras geométricas en el cielo.

Tanto la mitología griega como la sumeria o egipcia se valieron de la asociación mito-constelación. Ambos se justificaban entre sí: la constelación era la prueba del mito y éste a su vez daba significado a las figuras dibujadas por las estrellas.

Gracias a nuestra herencia cultural grecorromana, conocemos muchos más relatos mitológicos griegos que egipcios o mesopotámicos. Dedicaremos unas páginas a ilustrar unos pocos mitos que guardan estrecha relación con las constelaciones más grandes del cielo, por ejemplo el mito de Orión y el mito de Perseo, que además de abarcar una vasta área del cielo también involucran un gran número de constelaciones. Si el lector desea profundizar más sobre la mitología de otras constelaciones, puede remitirse a la bibliografía.

Antes de revisar la mitología, recordemos que los dioses griegos suelen ser más conocidos por sus nombres latinos, pues a consecuencia de la conquista romana de Grecia, los dioses de ambas civilizaciones, de parecidos atributos, se fundieron en una sola figura divina (ver tabla adjunta).

Nombre Griego	Nombre Latino
Hades	Plutón
Afrodita	Venus
Ares	Marte
Artemisa	Diana
Apolo	Febo
Atenea	Minerva
Cronos	Saturno
Démeter	Ceres
Hefesto	Vulcano
Hera	Juno
Hermes	Mercurio
Hestia	Vesta
Poseidón	Neptuno
Ouranos	Urano
Zeus	Júpiter

a) La Vía Láctea

La Vía Láctea (del latín, *camino de leche*), es una ancha zona o faja de luz blanca y difusa que atraviesa casi toda la esfera celeste. Según la mitología griega se formó por el chorro de leche salido del pecho de Hera[6] cuando amamantaba a Heracles (Hércules en latín).

b) El Mito de Orión

Orión es una de las constelaciones más grandes del cielo, se encuentra muy cerca de *Sirius* la estrella más brillante del cielo.

Ha sido parte de la mitología de diversas culturas, a modo de ejemplo, hay quienes afirman que la araña de las líneas de Nazca podría representar varias de las estrellas de dicha constelación. El primer registro que se tiene de ella es de Mesopotamia, en las *tablas de Mul.Apin* donde representa al "verdadero pastor celeste" representado por el personaje levantando un bastón o un arco. Para los egipcios las tres estrellas del cinturón (Alnitak, Alnilam y Mintaka) representan al dios celestial que representaba a Osiris. De la cultura helénica, en la Odisea Homero nos da una de las primeras referencias sobre Orión.

Los mitos asociados a Orión son numerosos y con muchas variantes, aquí expondremos algunos de ellos:

Un día Zeus, Hermes y Poseidón visitaron en su palacio a Hirieo, el fundador de la ciudad de Hiria. Éste para complacer a los dioses sacrificó el buey más hermoso de su rebaño.

Dado que Hirieo estaba deseoso de un descendiente, le preguntó a las deidades qué podía hacer para tener un hijo sin necesidad de una mujer. En respuesta de esto, Zeus le hizo traer la piel del buey que había sacrificado para ellos y le pidió que orinase encima. Luego de cumplir dicha instrucción, los dioses enterraron la piel en el jardín del palacio y se marcharon. Nueve meses más tarde, apareció un niño en el lugar donde la piel había sido enterrada, al que Hirieo dio el nombre de Orión (del griego *οὐρέω*, "orinar").

Se dice que cuando Orión alcanzó la edad adulta, era tan grande que podía caminar por el fondo del mar manteniendo la cabeza y los hombros fuera del agua.

Un día en Quíos, Orión se enamoró de *Mérope*, hija del rey *Enopión*. El rey, prometió a Orión que le daría a Mérope en matrimonio si libraba a la isla de las peligrosas fieras que atacaban a hombres y ganado; Enopión estaba convencido de que Orión no lo lograría.

[6]Hera, esposa de Zeus, era la diosa protectora del matrimonio y de los nacimientos, y presidía como divinidad tutelar todas las manifestaciones de la vida familiar.

Sin embargo, Orión terminó su trabajo y al reclamarla como esposa, Enopión le dijo que circulaban rumores de que aún quedaban leones, osos y lobos en las montañas, negándose a darle su hija, al parecer, debido a que él mismo estaba enamorado de ella.

Orión en un ataque de ira, habría cometido algunas barbaridades (algunos dicen que violó a Mérope, otros que destrozó el palacio). Como consecuencia de esto, Enopión, pidió venganza a *Dioniso*[7]. Éste siguiendo la petición de Enopión, pone a Orión en un sueño profundo, momento que aprovechó Enopión para arrancarle los ojos. En su desdicha Orión se dirigió al Oráculo, quien le dijo que recuperaría la vista si caminaba sin descanzo hacia el Este, justo como lo hacen las constelaciones. Atraido por el ruido del martillo de un cíclope, se dirigió a través del mar, hasta la isla de Lemnos. Allí encontró a *Cedalión*, un aprendiz de *Hefesto*[8], quien sobre los hombros de Orión le condujo por tierra y mar hasta llegar a la parte más lejana del océano, donde *Eos*[9] se enamoró de Orión y su hermano *Helios* le devolvió la vista.

Orión habría intentado vengarse de Enopión, pero al no encontrarlo en Quíos, continuó la búsqueda en Creta. Allí encontró a *Artemisa*[10], la diosa virgen de la caza, quien le convenció para que olvidase su venganza y para que se convirtiera en su compañero de caza.

Pero los enrredos amorosos de Orión no terminaron, ya que se enamoró de las *Pléyades*[11] a quienes acosó por años, por lo que *Atlas*, padre de las Pléyades, se quejó con Zeus, el cual envió a *Taurus* (el toro) para protegerlas.

La muerte de Orión se debe a un pequeño escorpión que le picó el pie, dándole muerte. La razón por la cual Orión fue picado por el escorpión tiene varias versiones, una de ellas, quizás la más popular, se refiere a un supuesto castigo de los dioses debido a que se había vuelto arrogante, llegando a decir que no existía animal que fuese rival para él. Otras versiones atribuyen a Artemisa el envío del escorpión en venganza del matrimonio con Eos o por un supuesto intento de violación (a Artemisa).

Artemisa apiadándose de Orión, le pidió a Zeus que lo situase entre las estrellas. Zeus lo ubicó en el lado opuesto de la bóveda celeste que al escorpión. Desde entonces cuando la constelación de Orión sale por el Este, Escorpión se oculta por el Oeste y viceversa. Zeus convirtió en estrellas a las Pléyades y aunque Orión habría persistido en su acoso, el toro no le permite alcanzarlas. Orión es acompañado en el cielo por sus perros *Canis Major* y *Canis Minor*.



[7]Dioniso es el dios tracio del vino, representando no sólo su poder tóxico sino también sus influencias sociales y beneficiosas. Es considerado promotor de la civilización, legislador y amante de la paz, así como dios protector de la agricultura y el teatro. Los griegos tomaron prestada la figura de Dioniso y la incorporaron a la tradición olímpica como hijo de Zeus y Sémele, hija de Cadmo, rey de Tebas, aunque otras versiones afirman que era hijo de Zeus y Perséfone.

[8]Hefesto es el dios del fuego y la forja, así como de los herreros, los artesanos, los escultores, los metales y la metalurgia.

[9]Eos era la diosa titánica de la aurora, que salía de su hogar al borde del Océano que rodeaba el mundo para anunciar a su hermano Helios, el Sol.

[10]Artemisa, hermana gemela de Apolo, fue fusionada con *Selene* la antigua diosa lunar, hija de los titanes Hiperión y Teia, y hermana de Helios, el Sol y de Eos, la diosa de la aurora. Así, el arco de plata que lleva Artemisa representa la Luna nueva.

[11]Las Pléyades llamadas también Atlántidas, son las siete hijas del dios titán Atlas y Pléyode. Ellas son: Alcíone, Maya, Astérope, Taigueta, Celæno, Eléctra y Mérope. Maya la mayor y más bella de las Pléyades es la madre de Hermes, Eléctra y Taijete, se casaron con Zeus. Alciona y Celæno, que se casaron con Poseidón, Astérope, se casó con Ares y Mérope, que se casó con un simple mortal, Sísifo.

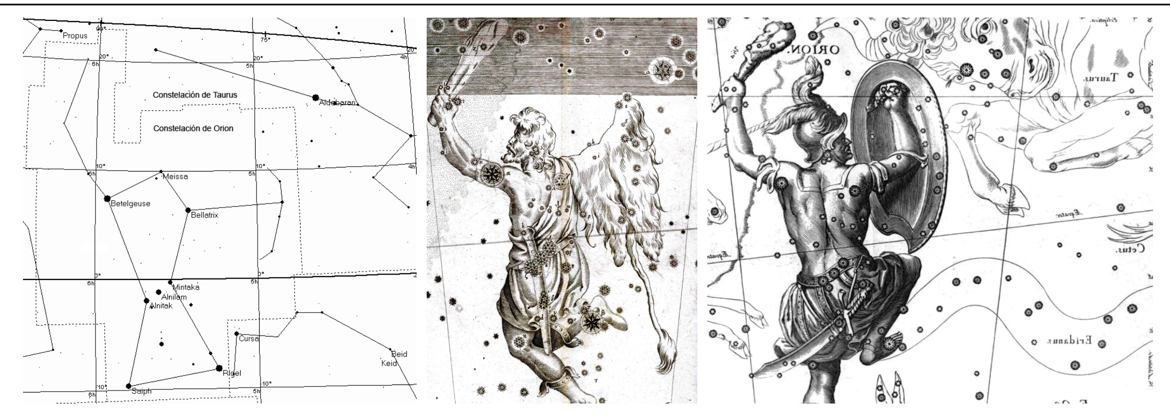


Figura 2.6: (Izquierda) Orión es una de las constelaciones más grandes de la bóveda celeste, posee dos estrellas de primera magnitud, Betelgeuse y Rigel, además de la famosa Nebulosa de Orión que se encuentra en el centro de la espada que cuelga de su cinturón.

Figura 2.7: (Centro) Grabado de Orión de la Uranometria de Johann Bayer (1603).

Figura 2.8: (Derecha) Grabado de Orión de la Uranographia de Johannes Hevelius (1690).

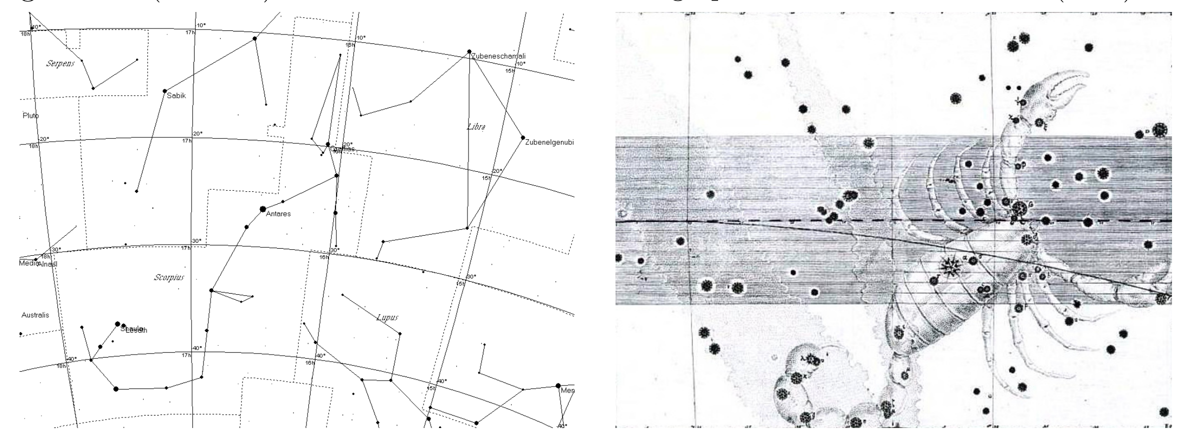


Figura 2.9: (Izquierda) Scorpius, la constelación del Escorpión. La estrella más brillante es Antares cuyo brillo y color son comparables con los del planeta Marte (Ares). Antares significa el rival de Ares. Es una de las cuatro estrellas reales junto con Aldebaran, Fomalhaut y Regulus.

Figura 2.10: (Derecha) Grabado de Escorpión de la Uranometria de Johann Bayer (1603).

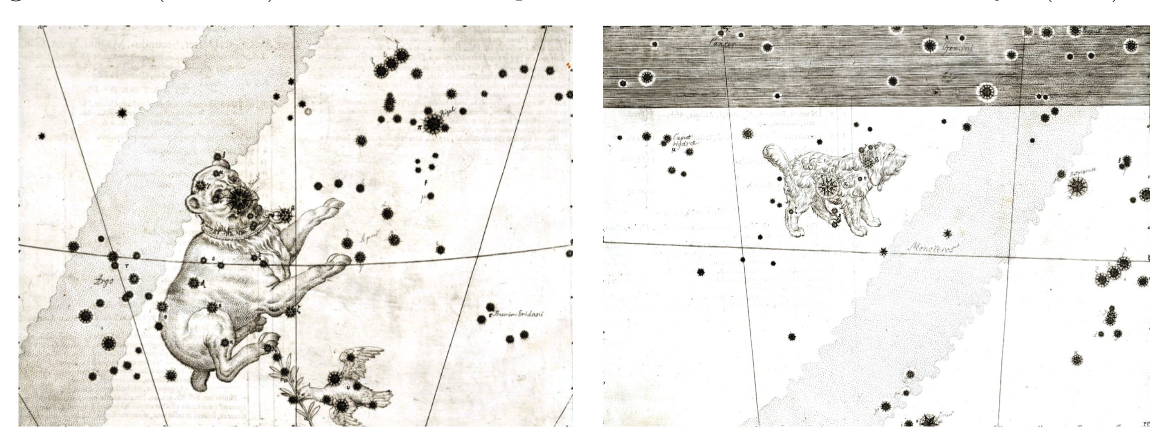


Figura 2.11: (Izquierda) Grabado del Gran Can de la Uranometria de Johann Bayer (1603). Su estrella más brillante Sirius (del griego Serios, que significa ardiente, abrazador), es la estrella más brillante del cielo nocturno vista desde la Tierra.

Figura 2.12: (Derecha) Grabado del Can Menor de la Uranometria de Johann Bayer (1603). Su estrella más brillante Procyon (palabra griega, significa antes del perro) es la octava estrella más brillante en el cielo nocturno.

c) El Mito de Perseo

Aunque varias de las constelaciones asociadas a este mito, no son visibles o asoman levemente sobre el horizonte en la zona central de Chile (o latitudes similares en Argentina y Uruguay como Buenos Aires y Montevideo), igualmente revisaremos este mito, por la vastedad de zonas del cielo que lo involucra y la coherencia entre el mito y las constelaciones.

Cassiopeia era esposa de Cefeo, rey de Etiopía[12]. Su vanidad la llevó a creer que era más hermosa que las Nereidas, las hijas de Neptuno. Debido a esto, Neptuno envió al mostruo marino *Cetus*[13], para destruir el reino de Etiopía. Ante esta situación Cefeo consultó al oráculo de Amón, que le aconsejó sacrificar a la única hija de los reyes, Andrómeda, exponiéndola encadenada a una roca de un acantilado para ser víctima del monstruo.

Andrómeda encadenada, fue vista por Perseo, que regresaba de su viaje después de derrotar a la *gorgona*, enamorándose de ella. Perseo propuso al rey matar al monstruo y liberarla, a cambio que se le concediera su mano.

De esta forma, montado en el Pegaso[14], Perseo al mostrarle la cabeza de la medusa dio muerte al mostruo convirtiéndolo en piedra. Liberó a Andrómeda y la llevó a Grecia donde contrajeron matrimonio.

A su muerte, Cassiopeia fue puesta en una silla obligada a dar vuelta en torno del polo celeste. Así cuando el movimiento de la esfera celeste la dejase literalmente de cabeza debía verse ridiculizada su belleza.

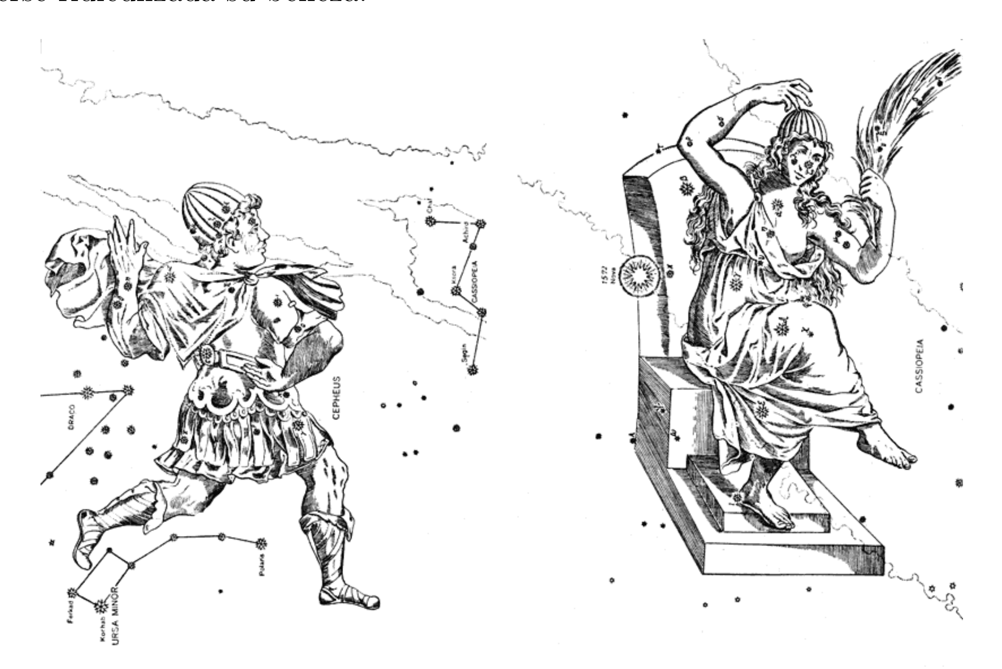


Figura 2.13: Cassiopeia y Cefeo, son dos constelaciones no visibles desde la zona central de Chile (o latitudes similares en Argentina y Uruguay como Buenos Aires y Montevideo), Cassiopeia es una constelación circumpolar al polo Norte celeste fácilmente identificable por su forma de W.

[12]Etiopía deriva del griego *Αἰθιοπία* (la tierra de los rostros quemados), nombre con el cual los griegos denominaban a un área muy extensa que abarcaba Nubia, el norte de Sudán, la actual Etiopía y parte del desierto de Libia.

[13]Aunque Cetus en latín (del griego kaitos) significa ballena, realmente en el mito correspondía a una serpiente marina.

[14]Pegaso es el caballo alado nacido de la sangre que brotó del cuello de Medusa.

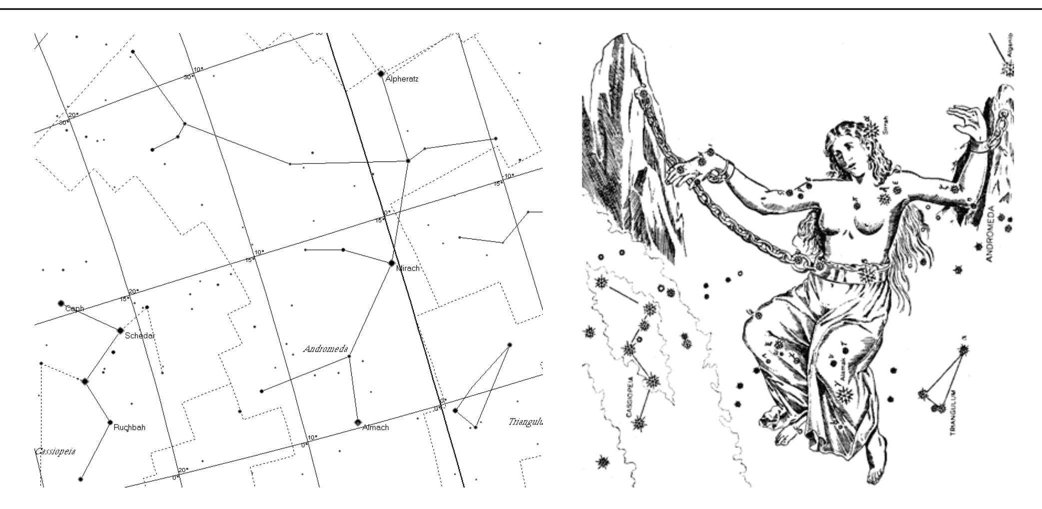


Figura 2.14: Andrómeda es una constelación que vista desde la zona central de Chile (o latitudes similares en Argentina y Uruguay como Buenos Aires y Montevideo), nunca sube mucho sobre el horizonte. Lo más destacable es la galaxia del mismo nombre o M-31, que en un cielo libre de contaminación, puede ser observada a simple vista.

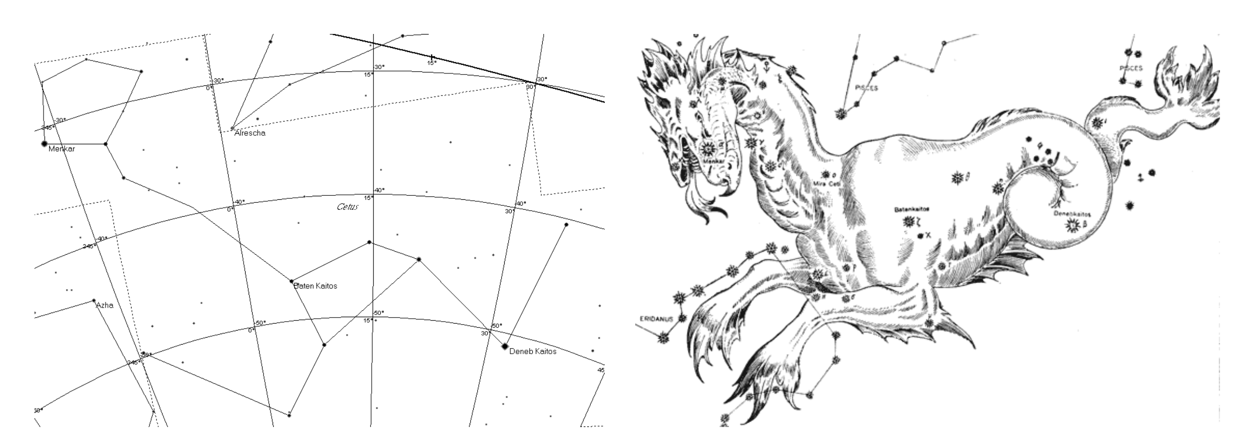


Figura 2.15: Cetus (el monstruo marino) es una constelación del hemisferio Sur.

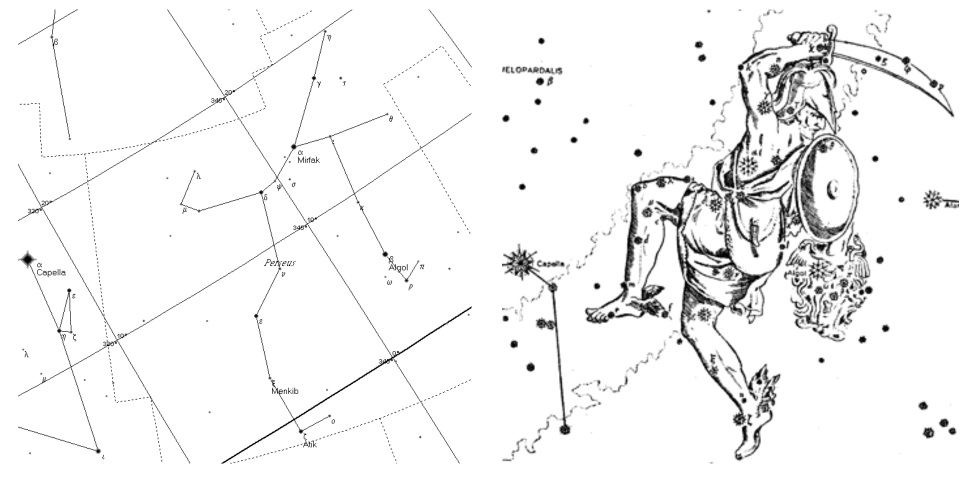


Figura 2.16: Perseus (Perseo) es la constelación del Norte que representa al héroe mitológico que decapitó a la Medusa. La estrella más destacable de esta constelación es Algol (del árabe *la cabeza del demonio*) y representa el ojo de la Medusa.

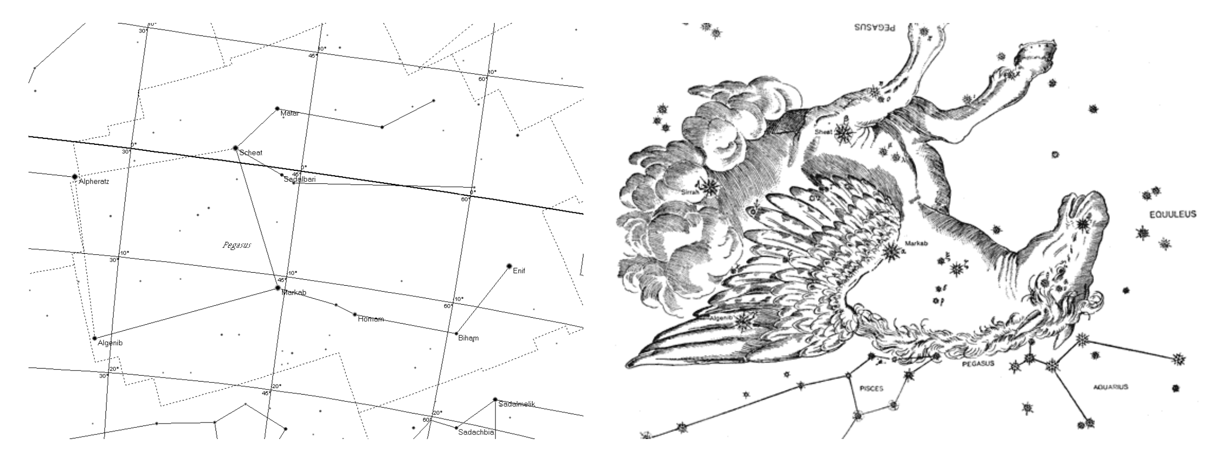


Figura 2.17: Pegasus (Pegaso) es la constelación del Norte que representa al caballo alado, está compuesta por un gran cuadrado, del cual, una de las cuatro estrellas, usualmente llamada "*Alpheratz*", es ahora considerada parte de Andrómeda, (α-*Andromedæ*). De esta forma, el cuadrado se convierte en un triángulo que representaría una de las alas.

d) Mito del Centauro

Cronos el rey de los dioses titánicos, intentó seducir a su sobrina la ninfa Filira, ella para escapar al acoso se transformó en yegua, pero Cronos astutamente se convierte en caballo y de esta forma consigue poseerla. De esta unión nace Quirón con cuerpo y patas de caballo, torso y brazos de hombre. Dado que Cronos devoraba a sus hijos (este mito será visto en el Volumen II, capítulo 5) Filira lo escondió en una cueva. Fue adoptado y educado por Apolo y Atenea.

Quirón fue un sabio respetado por los mortales: fue médico, músico, filósofo y conocía cosas prácticas como el arte de la guerra y de la caza. En virtud de sus conocimientos fue maestro del dios Asclepio y de algunos héroes griegos como Aquiles.

Al parecer Heracles (Hércules) también fue amigo de Quirón de quien escuchaba consejos, e incluso convivieron juntos en su cueva. Un día por accidente cayó del carcaj[15] de Heracles, una flecha envenenada con la sangre de la Hidra (la cual no tenía antídoto), hiriendo a Quirón en el talón. Una versión indica que murió producto de la flecha en el pié, y que Zeus en premio a su piedad y el fatal accidente producido por su hijo Heracles, le pone entre las estrellas.

Otra versión dice que Quirón era inmortal y no muere, pero su herida tampoco podía sanar, causándole gran dolor y sufrimiento. A causa de esto en vez de lamentarse, se dedicó al estudio del dolor y las formas de superarlo. Desde ese momento se dedicó al cuidado de los heridos y enfermos, siendo uno de los creadores de la medicina y la cirugía.

Heracles buscó a Prometeo, quien por entregar el fuego a los hombres cumplía el castigo dado por Zeus; un águila (hija de los monstruos Tifón y Equidna) comía su hígado. Siendo éste inmortal, su hígado volvía a crecerle cada día, y el águila volvía a comérselo cada noche. Este castigo duraría hasta que alguien tuviera piedad de él y muriera en su lugar. Heracles le liberó disparando una flecha al águila, y solicitó a Zeus, con la venia de Quirón, que éste último muriera en su lugar, para así detener el sufrimiento del centauro. Zeus acepta, y una vez muerto, le pone entre las estrellas.

[15]El carcaj o aljaba es una caja o cilindro de piel, madera o tela usada por los arqueros para transportar las flechas.

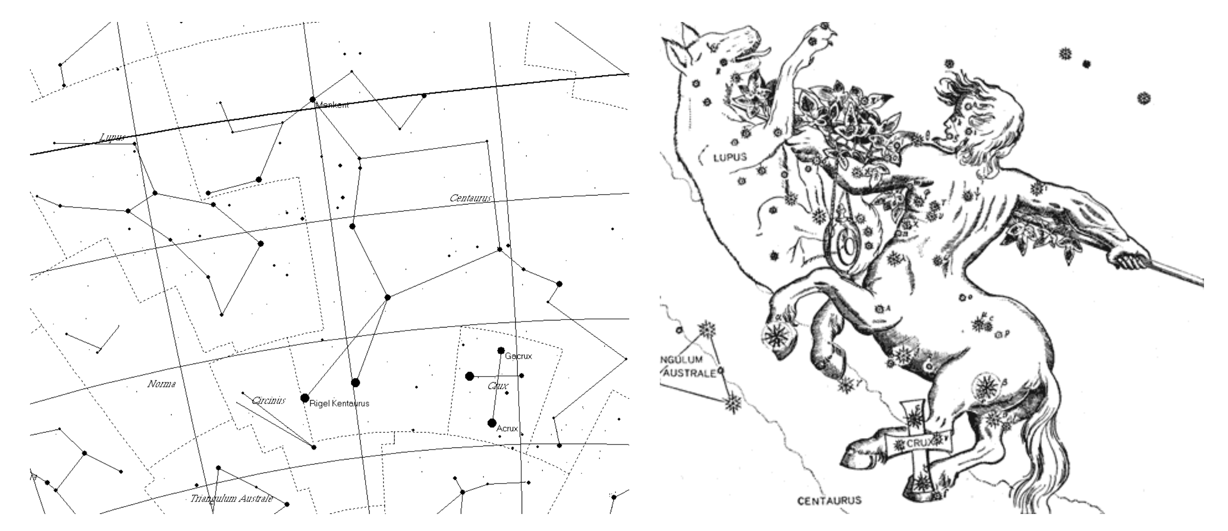


Figura 2.18: Constelación y figura mitológica del Centauro, se aprecian las estrellas más importantes con sus respectivas ubicaciones. Aunque no hay unanimidad, Quirón estaría representado por la constelación del Centauro, y no estaría representada a la constelación de Sagitario, la que estaría asociada al sátiro *Croto*, quien inventó el arte de disparar con arco.

2.3. Movimientos de la Esfera Celeste

Hemos supuesto que las estrellas se encuentran fijas en la esfera celeste y ésta gira en torno de la Tierra de *Este a Oeste*, dando así cuenta del movimiento de las estrellas. Llamaremos a este movimiento la *rotación sideral*.

El Sol no está fijo respecto de las estrellas de fondo, la línea que traza el Sol sobre la esfera celeste en su movimiento anual se llama la *eclíptica*, también recibe este nombre el plano que la contiene.

El *plano ecuatorial* es el plano que pasa por el centro de la Tierra y que es perpendicular al eje de rotación de la esfera celeste. El *ecuador celeste*, o *línea equinoccial* es la curva de intersección entre el plano ecuatorial y la esfera celeste. Ecuador, del latín *aequātor* significa "igualador", recibe este nombre debido a que las estrellas que se encuentran sobre esta línea pasan, a diferencia del resto de las estrellas, el mismo tiempo sobre y bajo el horizonte.

El plano de la eclíptica no coincide con el plano ecuatorial. Los puntos de intersección del ecuador celeste con la eclíptica son llamados puntos equinocciales y los puntos de la eclíptica con máxima declinación, es decir, la máxima separación angular al ecuador celeste, son llamados solsticios. Existe un punto de solsticio en cada hemisferio celeste.

Los equinoccios se llaman *punto Aries*, y *punto Libra*. El meridiano celeste que pasa por el punto Aries define el *meridiano cero* celeste.

Debido al movimiento del Sol respecto de la esfera celeste, el período de rotación sideral no es exactamente un día.

Se llama *día sideral*, al intervalo de tiempo que requiere cualquier estrella en volver a pasar, de un día al siguiente, por el mismo meridiano celeste.

Se llama *día solar*, al intervalo de tiempo que requiere el Sol para volver a pasar, de un día al siguiente, por el mismo meridiano celeste.

Dado que el Sol no se mueve a un ritmo constante sobre la esfera celeste, se debe introducir un *día solar medio* que supone que el Sol se mueve a razón constante y sobre el

ecuador celeste. El día solar medio es ligeramente mayor que el día sideral en 3 minutos 55,51 segundos.

El *tiempo local standard* es el tiempo que indican nuestros relojes y es derivado del tiempo solar medio, pero dado que las estrellas se mueven de acuerdo al tiempo sideral, surgen 3 minutos 55,51 segundos más temprano cada noche. Debido a esto, los astrónomos prefieren usar el tiempo sideral para registrar sus observaciones.

Los observatorios astronómicos cuentan con varios relojes, uno que muestra el tiempo sideral local, otro con el tiempo local standard y otro con el el tiempo universal (TU o UT), también conocido como tiempo medio de Greenwich.

Desde el punto de vista heliocéntrico, la diferencia entre el día sideral y el día solar medio se debe a que la Tierra se mueve una pequeña distancia a lo largo de su órbita durante un día, por ello, visto desde la Tierra, el Sol cada día desplaza su posición en el cielo ligeramente hacia el Oeste, y debido a esto, una estrella distante requiere un poco más de tiempo cada día para volver a pasar por el meridiano celeste.

Hiparco hacia el 130 a. de C. terminó de elaborar un catálogo estelar con posiciones, usando cantidades angulares referidas a la eclíptica y a un eje perpendicular a ese plano, y magnitudes de 850 estrellas. Al comparar las coordenadas estelares con aquellas consignadas en antiguas fuentes caldeas y griegas como el libro de Eudoxo, encontró que no coincidían, habiendo experimentado por ende cambios importantes en sus posiciones, y que no se podían atribuir a errores de observación, por lo que interpretó que había ocurrido de un cambio en la dirección del eje de rotación de la esfera celeste. Este movimiento se denomina *precesión de los equinoccios*, debido a que los puntos equinocciales se desplazan retrogradando cerca de 50,25 segundos de arco por año. Así, luego de 25.781 años, el eje de rotación de la esfera celeste completa un período en torno del *Polo Eclíptico*.



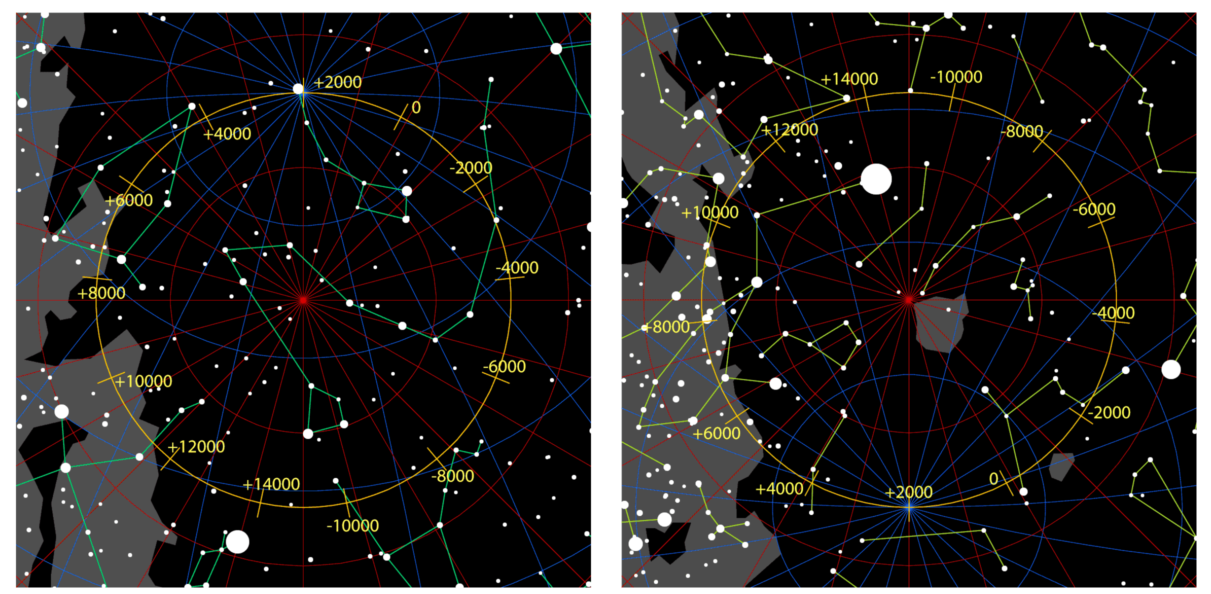


Figura 2.19: Trayectoria de los Polos Celestes (círculo amarillo) en torno del Polo Eclíptico: a la izquierda el Polo Norte Celeste y a la derecha el Polo Sur Celeste. Observe la existencia en ciertas épocas de estrellas Polares. Fuente de las imágenes: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Precession_N.gif y http://en.wikipedia.org/wiki/File:Precession_S.gif

Es este movimiento el que ha desplazado gradualmente las posiciones de las constelaciones en el cielo y, en particular, los períodos del año que corresponden a cada constelación

zodiacal, además produce que en ciertas épocas exista alguna estrella polar, como lo es en la actualidad *Polaris* en el hemisferio Norte.

Es también debido al movimiento de precesión que el punto Aries y el punto Libra no se hallan en las constelaciones del mismo nombre, sino que en sus vecinas Piscis y Virgo respectivamente (ver figura 2.19).

2.4. Movimiento del Sol

Como hemos ya mencionado, el Sol se mueve a través de la bóveda celeste. Su trayectoria es denominada la eclíptica.

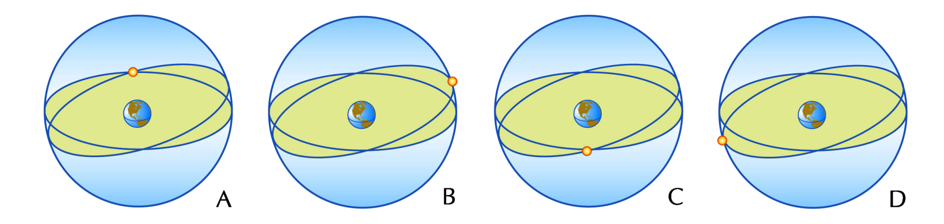


Figura 2.20: Movimiento del Sol sobre la esfera celeste. En particular ubicado en los puntos de los equinoccios (A y C) y de los solsticios (B y D).

El Sol pasa por los puntos de los equinoccios, entre el 20 y 21 de Marzo cuando pasa del hemisferio Sur al Norte celeste, y el 22 y 23 de Septiembre cuando pasa del hemisferio Norte al Sur celeste. Estos puntos equinocciales son llamados *punto Aries* (figura 2.20 A) y *punto Libra* (figura 2.20 C) respectivamente. El día del equinoccio, un observador ecuatorial ve el Sol en el cenit al medio día, el Sol describe una trayectoria aparentemente ecuatorial, estando 12 hrs. por sobre el horizonte y 12 hrs. debajo en cualquier latitud, de allí el nombre de equinoccio.



El día 22 o 23 de junio el Sol alcanza su máxima declinación Norte (figura 2.20 B), es decir, en el hemisferio boreal alcanza su máxima altura sobre el horizonte, alcanzando al mediodía el cenit en una línea paralela al Ecuador llamada *trópico de Cáncer* (paralelo 23° 27' N). Todas las regiones situadas a latitudes mayores al círculo polar Ártico (paralelo 66° 33' N) reciben permanentemente la luz del Sol (figura 2.21).



Figura 2.21: El Sol de medianoche es un fenómeno observable en latitudes próximas al círculo polar Ártico y al círculo polar Antártico. Consiste en que el Sol es visible las 24 horas del día, en las fechas próximas al solsticio de verano. Créditos: Ole P. Røervik © Aune Forlag.

En el resto del hemisferio los días son los más largos y las noches las más cortas. Por el contrario, en el hemisferio austral la situación es la opuesta, los días son más cortos y las noches más largas. En el círculo polar antártico es noche permanente.

El día 21 o 22 de diciembre el Sol alcanza su máxima declinación Sur (figura 2.20 D), es decir, en el hemisferio austral alcanza su máxima altura sobre el horizonte, alcanzando al mediodía el cenit en una línea paralela al Ecuador llamada *trópico de Capricornio*. Todas las regiones situadas a latitudes menores al círculo polar antártico reciben permanentemente la luz del Sol. En el resto del hemisferio los días son los más largos y las noches las más cortas. Por el contrario, en el hemisferio boreal la situación es la opuesta, los días son más cortos y las noches más largas. En el círculo polar Ártico es noche permanente.

2.5. Movimiento de la Luna

La Luna es el cuerpo celeste más cercano a la Tierra. Ya desde la antigüedad se le reconoció como el más cercano, debido a que en su recorrido por la bóveda celeste puede ocultar a todos los otros planetas.

En ninguno de los modelos generado por los antiguos griegos (ver Apéndice C) se rechaza el hecho que la Luna se mueve en torno de la Tierra. El tiempo que tarda en este movimiento (*revolución sideral*) es de cerca de 27 [d] 7 [h] 43 [min] y 29 [d] 12 [h] 44 [min] en su movimiento respecto al Sol (*revolución sinódica*), siendo esta última revolución la que rige las fases de la Luna y los eclipses.

A partir del tamaño de la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse lunar, antiguos griegos pudieron calcular el tamaño de la Luna. *Aristarco de Samos* (310 - 230 a. de C.) realizó cálculos para determinar la distancia entre la Tierra, la Luna y el Sol. Cuando la mitad de la Luna es iluminada se forma un triángulo rectángulo entre la Tierra, la Luna y el Sol. Midiendo el ángulo entre el Sol y la Luna se puede calcular, gracias a razonamientos geométricos, dichas distancias.

Aristarco obtuvo que la distancia Tierra-Luna es de 56 radios terrestres, la distancia Tierra-Sol es unas 19 veces mayor que la Tierra-Luna[16] y determinó que el radio de la Luna es cerca un tercio del terrestre.

En uno de sus viajes a Hispania, *Posidonio de Apamea* (135 - 50 a. de C.), observó las mareas de la costa atlántica (que son mayores que las mediterráneas), y las relacionó con la influencia lunar, la explicación de esta relación (ver Capítulo 3) fue dada por *Isaac Newton* (1642 - 1727).

La Luna nos presenta siempre la misma cara, esto solo puede entenderse asumiendo que ella debe dar una revolución sobre sí misma en el mismo tiempo que tarda en dar una vuelta en torno a la Tierra, a este fenómeno se le denomina *rotación sincrónica* (ver Capítulo 3).



Figura 2.22: Cara visible de la Luna.

[16]Este último cálculo es en realidad erróneo.

Como el Sol ilumina siempre la mitad de la Luna, y esta mitad en general no coincide con la cara que vemos desde la Tierra, se produce un fenómeno llamado *fases lunares* (figura 2.23).

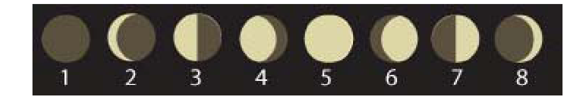


Figura 2.23: Las fases de la Luna en el hemisferio Sur: 1. Luna nueva (novilunio) 2.-4. creciente, 3. cuarto creciente, 5. Luna Llena (plenilunio), 6.-8. menguante, 7. cuarto menguante. Para el hemisferio norte el orden sería el inverso.

La Luna aparece sobre el horizonte aproximadamente una hora más tarde cada día, esto se debe a que hay dos movimientos involucrados, la rotación de la esfera celeste y el movimiento de rotación lunar en torno de la Tierra. Esta combinación de movimientos da como resultado que la salida de la Luna se retrase cerca de 51 [min] cada día. Un sencillo cálculo nos permite evidenciar lo expresado anteriormente. En un día, la Luna habrá recorrido un 1/28 de su órbita alrededor de la Tierra, lo cual corresponde a:

$$\frac{360^\circ}{28} \simeq 12{,}857^\circ$$

pero el tiempo que se requiere para recorrer este arco es:

$$\frac{1}{28} \cdot 24 \cdot 60 \simeq 51{,}429 \ \ [\text{min}]$$

Así la Luna aparece sobre el horizonte aproximadamente 51 [min] más tarde cada día.

La Luna no se encuentra siempre a la misma distancia de la Tierra, por ello el tamaño aparente cambia, es mínimo cuando alcanza la mayor distancia posible de la Tierra (apogeo) y es máximo cuando alcanza la menor distancia posible de la Tierra (perigeo).



Figura 2.24: Comparación de tamaños relativos de la Luna en el perigeo (izquierda) y el apogeo (derecha). Créditos & copyright: Guillermo Abramson.

A continuación daremos definiciones precisas de los diferentes períodos de revolución, respecto de diferentes referencias:

Período de revolución sinódica: Es el intervalo de tiempo necesario para que la Luna vuelva a tener una posición análoga con respecto al Sol y a la Tierra, su duración es de 29 [días], 12 [h], 44 [min], 2,78 [s]. También se le denomina *mes lunar* o lunación.

Período de revolución sideral: Es el intervalo de tiempo necesario para que la Luna vuelva a tener una posición análoga con respecto a las estrellas fijas, su duración es de 27 [días], 7 [h], 43 [min], 11,5 [s].

Período de revolución trópica: Es el intervalo de tiempo necesario para que la Luna vuelva a tener una determinada longitud celeste. Su duración es de 27 [días], 7 [h], 43 [min], 4,7 [s].

Período de revolución anomalística: Es el intervalo de tiempo entre dos pasos consecutivos de la Luna por el *perigeo*. Su duración es de 27 [días], 13 [h], 18 [min], 33 [s].

Período de revolución draconítica: Es el intervalo de tiempo entre dos pasos consecutivos de la Luna por el *nodo ascendente*. Su duración es de 27 [días], 5 [h], 5 [min], 36 [s].

2.6. Movimientos de los Planetas

Planeta (del griego πλανήλης, errante) es la denominación que daban los antiguos griegos a los cuerpos celestes que se movían respecto a las estrellas fijas de la esfera celeste. De acuerdo a lo anterior, los planetas son siete y reciben nombres latinos de dioses de la mitología griega: el Sol (Helios), la Luna (Selene), y otros cinco: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

Latín	Italiano	Español	Francés
Dies Solis	Domenica	Domingo	Dimanche
Dies Lunæ	Lunedì	Lunes	Lundi
Dies Martis	Martedì	Martes	Mardi
Dies Mercurii	Mercoledì	Miércoles	Mercredi
Dies Iovis	Giovedì	Jueves	Jeudi
Dies Veneris	Venerdì	Viernes	Vendredi
Dies Saturni	Sabato	Sábado	Samedi

Tabla 2.3: Los nombres de los días de la semana provienen de los dioses asociados con cada uno de los planetas. Aquí se muestran en latín y algunos idiomas que derivan de él.

Si asignamos cíclicamente a los días, los nombres de los planetas, podemos definir una nueva unidad patrón de tiempo de siete días, *la semana*. Los días son: Lunes por la Luna, Martes por Marte, Miércoles por Mercurio, Jueves por Júpiter y Viernes por Venus. Los días correspondientes a Saturno y el Sol han sido reemplazados por Sábado y Domingo. Sábado proviene del latín bíblico *sabbătum*, que proviene del griego σάββατον, que a su vez proviene del hebreo *šabbāt*, y este del acadio[17] *šabattum*, que significa descanso y según libros antiguos (ver por ejemplo el libro del éxodo 20:11) era el día que los hombres debían descansar. Por otra parte, el Domingo proviene del latín *dominĭcus* que significa día del Señor. Así el mes lunar de cerca de 28 días puede ser dividido en cuatro semanas.

Los planetas se mueven en la esfera celeste de Oeste a Este, ubicándose en una estrecha franja de unos 8,5° de ancho[18] a cada lado de la eclíptica, la denominada *banda zodiacal*.

El Sol y la Luna poseen movimientos regulares de Oeste a Este, sin embargo, los cinco

[17]El acadio es una lengua semítica actualmente extinta, hablada en la antigua Mesopotamia principalmente por asirios y babilonios durante el II milenio a. de C.

[18]Para poder tener una referencia aproximada de tamaños o separación angular de objetos en el cielo, podemos usar el ancho de un dedo, teniendo extendido el brazo, que mide aproximadamente 1° y el ancho del puño es aproximadamente 10°.

planetas restantes, avanzan de Oeste a Este hasta un cierto punto[19], al acercarse a dicho punto, disminuyen su velocidad de avance o *propia*, hasta quedar estacionarios para luego realizar un movimiento en sentido contrario hasta alcanzar otra posición estacionaria, donde retoman su movimiento regular de Oeste a Este. A este movimiento en sentido contrario se le conoce como "*movimiento retrógrado*" y fue uno de los problemas más grandes que tuvieron los antiguos griegos al tratar de generar modelos que describieran el movimiento planetario (ver Apéndice C).

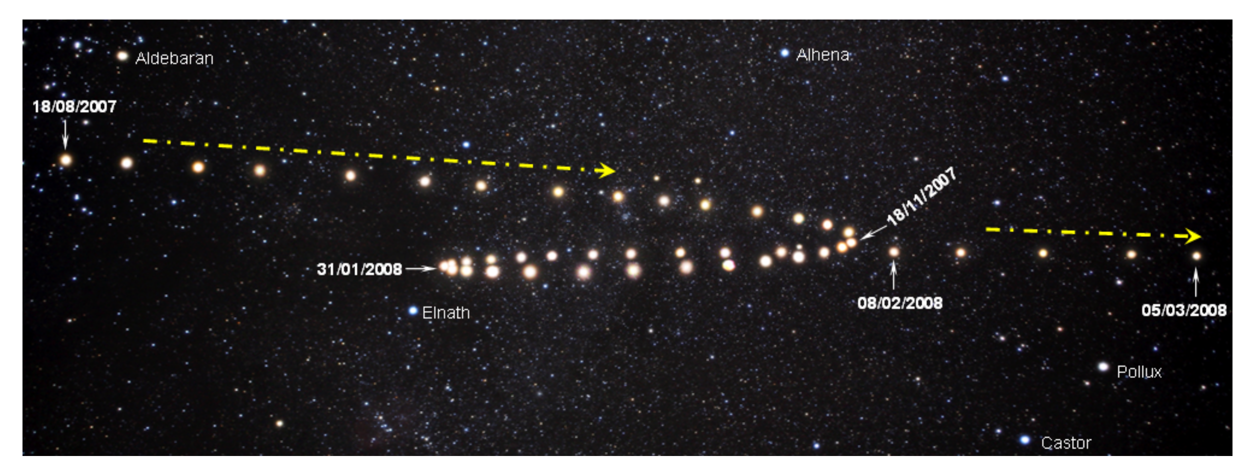


Figura 2.25: Movimiento Retrógrado: Marte en su movimiento respecto de las estrellas de fondo, se desplaza hacia el Este. Al acercarse a cierto punto de la trayectoria comienza a disminuir la velocidad de avance hasta que permanece estacionario en dicho punto (en este caso el 18/11), luego comienza un movimiento en sentido contrario hasta alcanzar otra posición estacionaria (en este caso el 31/01), prosiguiendo luego su movimiento habitual de Oeste a Este. Créditos y copyright: Tunç Tezel.

Llamaremos *período sinódico* al tiempo que tarda un cuerpo celeste en volver a aparecer en el mismo punto del cielo respecto del Sol, cuando se observa desde la Tierra. Éste es el tiempo que transcurre entre dos conjunciones sucesivas con el Sol, y es el período orbital aparente.

Planeta	Período Sinódico	Período de Retrogradación
Mercurio	116 días	23 días
Venus	584 días	42 días
Marte	780 días	73 días
Júpiter	399 días	123 días
Saturno	378 días	138 días

Tabla 2.4: La acuciosidad de las observaciones de los antiguos griegos, les permitió conocer los períodos sinódicos y de las retrogradaciones.

Se llama *elongación* al ángulo que, medido desde la Tierra, forman el Sol y un planeta. Los planetas, de acuerdo a la elongación que alcanzan en su movimiento por la bóbeda celeste, pueden ser agrupados en dos tipos: *Inferiores* y *Superiores*.

[19]Los puntos estacionarios no están fijos sobre la esfera celeste, ni tampoco son los mismos para los distintos planetas.

2.6.1. Los Planetas Inferiores

Mercurio y Venus, son llamados planetas inferiores y la principal característica de su movimiento sobre la esfera celeste, es que nunca se alejan demasiado del Sol.



Figura 2.26: Movimiento de Mercurio por la esfera celeste durante el atardecer, la fotografía permite apreciar diferentes elongaciones. Imagen: J.C. Casado © tierrayestrellas.com.

Mercurio tiene una elongación máxima de 23°, mientras que la elongación máxima de Venus es de 45°.

Se dice que un planeta está en *conjunción* cuando su elongación con el Sol es cero. Si el planeta es ocultado por él es llamada *conjunción superior*, en caso contrario es llamada *conjunción inferior*. Note que durante la conjunción superior el planeta no es visible mientras que en conjunción inferior el planeta nos muestra la cara que no está iluminada por el Sol.

Cuando un planeta inferior está situado al Este del Sol, aparece como lucero vespertino, ocultándose bajo del horizonte poco tiempo después que el Sol. Este intervalo de tiempo depende de su elongación. Luego de alcanzar su elongación máxima oriental retrogradan hasta situarse al Oeste del Sol, convirtiéndose en lucero matutino, apareciendo poco antes del alba y desapareciendo cuando la luz del Sol no nos permite seguir observándolo.

2.6.2. Los Planetas Superiores

Los restantes planetas (Marte, Júpiter y Saturno) son llamados planetas superiores. La elongación de estos planetas puede tomar cualquier valor ya que son observables en cualquier lugar de la franja zodiacal.

Se dice que un planeta superior está en *conjunción* con el Sol cuando su elongación es cero, siendo siempre ocultados por él, si su elongación es de 90°, se dice que el planeta está en *cuadratura*. Por otra parte se dice que un planeta está en *oposición* cuando su elongación es de 180°, su nombre se debe a que se encuentran en una posición diametralmente opuesta al Sol y debido a esto, el planeta pasa por el meridiano del lu-

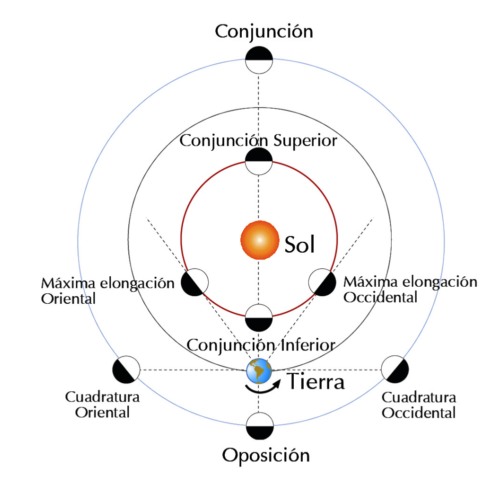


Figura 2.27: Visión heliocéntrica de las diferentes posiciones planetarias vistas desde la Tierra.

gar a medianoche. El movimiento de retrogradación sólo se produce en las cercanías de la oposición, presentando entonces su máximo brillo. Ya los antiguos griegos, a partir del siglo IV a. de C. habían interpretado el aumento de brillo como una disminución de la distancia del planeta a la Tierra. Esto es particularmente apreciable en el caso de Marte, pues su brillo en oposición sólo es superado por la Luna y Venus.

2.7. La Tierra

Desde el punto de vista geocéntrico la Tierra es el centro del mundo. *Tales de Mileto* (∼600 a. de C.) es el primero, del que se tiene registro, que planteó la idea que la Tierra es una esfera, sin embargo, fue *Aristocles de Atenas* (428 - 348 a. de C.), más conocido por su apodo "*Platón*", quien introdujo esta idea con argumentos filosóficos, planteando también su inmovilidad.

La evidencia de la esfericidad de la Tierra es variada y contundente, Ptolomeo las resume indicando los siguientes hechos:

- El Sol, la Luna y las otras estrellas no salen ni se ocultan simultáneamente para cualquier observador, sino que lo hacen primero para aquellos que están situados más al Este, y después para los que se localizan en el Oeste.

- Durante los eclipses, en especial en los lunares, nunca son registrados a la misma hora por todos ellos. Mas bien, la hora consignada por quienes los observan desde posiciones ubicadas más hacia el Este, es siempre más tardía que la reportada por quienes están hacia el Oeste. Encontramos que las diferencias en los tiempos son proporcionales a las distancias que hay entre los lugares de observación, por lo que razonablemente puede concluirse que la superficie de la Tierra es esférica.

Otro hecho fácilmente evidenciable, es la desaparición de naves en el horizonte, primero lo hacen la parte inferior y posteriormente las partes más altas.

Eratóstenes de Cirene (∼275 - 194 a. de C.) vivió en Atenas hasta que se le encargó la dirección de la biblioteca de Alejandría, siendo el primero en la historia en calcular las dimensiones de la Tierra.

En una ocasión leyó en un papiro, que en Siena, un puesto avanzado de la frontera meridional, cerca de la primera catarata del Nilo, en el día del solsticio de verano, durante el transcurso de la mañana y acercándose al mediodía, la sombra del obelisco de la ciudad iba acortándose, para desaparecer completamente justo al mediodía. En ese momento, también podía verse el Sol reflejado en el agua en el fondo de un pozo hondo, pues el Sol se encontraba justo en el cenit.

Profundamente intrigado por este fenómeno, observó que al mediodía del día del solsticio de verano, en Alejandría un palo vertical si proyectaba sombra.

Eratóstenes razonó que la única forma que al mediodía del solsticio un palo no proyecte sombra en Siena, pero si lo haga en Alejandría, es que la Tierra no sea plana. Para Eratóstenes esto fue solo una prueba más del hecho ya aceptado, la esfericidad de la Tierra, pero la genialidad de Eratóstenes fue descubrir que con esto se podía determinar el valor del radio terrestre. El entendió que mientras mayor sea la curvatura, mayor será la longitud de la sombra. Haciendo mediciones, de la longitud de la sombra obtuvo que el ángulo que forma el palo con la vertical, era de 7,2°, esto corresponde a la cincuentava

parte de una circunferencia. Además, de alguna forma que desconocemos en la actualidad, habría conocido la distancia entre Alejandría y Siena, obteniendo con ello un valor de cerca de 5.000 estadios ($\sim$ 840,6 [km]).

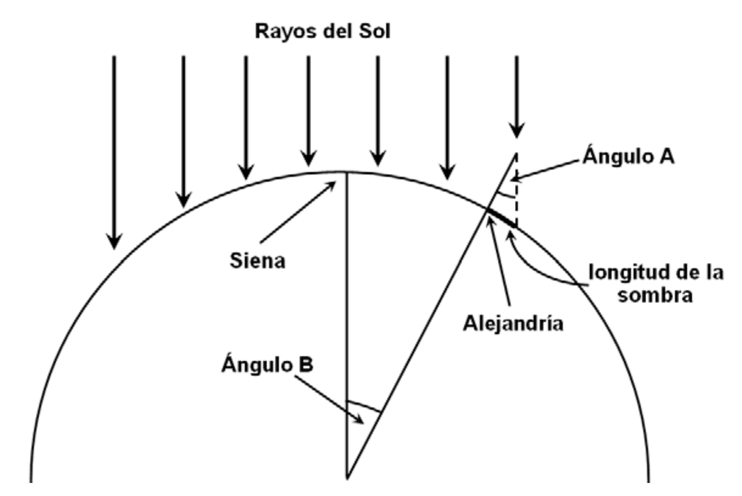


Figura 2.28: Cálculo de la circunferencia de la Tierra. Eratóstenes logro medir el ángulo A, y de la geometría elemental se sabe que éste tiene el mismo valor que el ángulo B. Conociendo, la fracción de la circunferencia que corresponde a dicho ángulo y la medida de la longitud del arco (distancia Alejandría-Siena), resulta sencillo obtener la circunferencia y/o el radio de la Tierra. Figura adaptada de Cosmos, la serie de TV. © Carl Sagan Productions, Inc.

En consecuencia la circunferencia de la Tierra debía ser:

$$50 \cdot 5000 = 250000 \text{ [estadios]}$$
$$50 \cdot 840{,}6 = 42030 \text{ [km]}$$

La exactitud de este cálculo depende, obviamente, de la equivalencia entre un estadio y el metro, pero este es un problema que para nosotros será irrelevante, pues conociendo la distancia con cierto grado de exactitud el error es mínimo, y se debería a que ambas ciudades no están sobre el mismo meridiano.

Posidonio de Apamea usó otro método para calcular las dimensiones de la Tierra. Usando como referencia *Canopus*, una estrella de la constelación de *Carina* (la quilla) que no se ve desde Rodas, pero sí desde Alejandría, situada más al Sur.

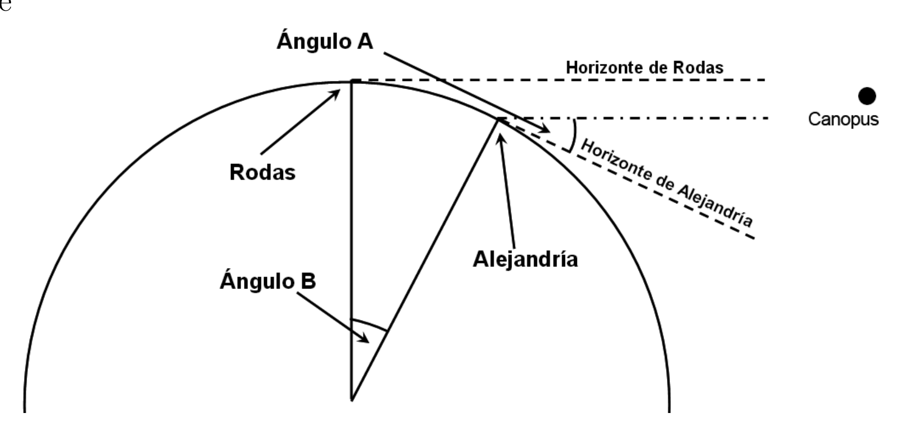


Figura 2.29: El punto a la derecha representa a Canopus que se encuentra en el horizonte en Rodas, pero al mismo tiempo, se encuentra a un ángulo A sobre el horizonte de Alejandría.

Posidonio observó que cierto día, Canopus se encontraba justo a la altura del horizonte desde Rodas, observando desde Alejandría determinó que en ese momento Canopus está a 7,5° sobre el horizonte. Suponiendo que Rodas y Alejandría estan en el mismo meridiano, dicho ángulo es el mismo que forman los radios desde ambas ciudades al centro de la Tierra (ángulo A = ángulo B). 7,5° corresponde a la cuarenta y ochoava parte de una circunferencia. y sabiendo que entre Rodas y Alejandría hay 5.000 estadios, la circunferencia de la Tierra debía ser:

$$48 \cdot 5000 = 240000 \text{ [estadios]}$$

Resulta que esta medición es en realidad incorrecta, pues la distancia entre Rodas y Alejandría es unos 600 [km] (usted puede verificar esto usando por ejemplo *Google Earth*), lo cual correspondería a 3.600 [estadios] de Eratóstenes, siendo en realidad el ángulo de 5,4°.

Años más tarde, el geógrafo de Augusto, *Estrabón*, deja registrado que Posidonio creía que la distancia ente Rodas y Alejandria era en realidad 3.750 estadios, distancia que aunque relativamente correcta, con el ángulo erróneo resulta:

$$48 \cdot 3750 = 180000 \text{ [estadios]}$$

esto es, el valor erróneo de 31.500 [km]. Este valor será adaptado por Ptolomeo a 30.000 [km], lo que producirá 1500 años más tarde que Colón creyera haber llegado a la India y a Magallanes aventurarse en el Oceáno Pacífico en busca de las *islas Molucas* y sus preciadas especias, descubriendo a duras penas que la circunferencia de la Tierra era 8.575 [km] más grande de lo que creía.

El valor del radio terrestre obtenido en la actualidad es de 6.378 [km], por lo cual la circunferencia de la Tierra es:

$$2\pi \cdot 6378 = 40074 \text{ [km]}$$

Luego podemos usar los cálculos de Aristarco para obtener el diámetro y la distancia Tierra-Luna. Los datos medidos en la actualidad son 384.400 [km] para la distancia Tierra-Luna y su diámetro es 3.476 [km].

2.8. Tránsitos Planetarios

Se llama *tránsito* astronómico, al paso de un cuerpo celeste por delante de otro de mayor tamaño relativo. Si los tamaños relativos son similares, entonces el tránsito se denomina *eclipse*. Desde la Tierra podemos observar tránsitos entre un planeta y una estrella, tránsitos entre satélites y planetas.

Nos dedicaremos a estudiar los tránsitos entre un planeta del sistema solar y el Sol. Desde la Tierra son visibles solo los tránsitos de los planetas inferiores, es decir, Mercurio y Venus. Si estos planetas y la Tierra orbitasen en el mismo plano veríamos pasar a dichos planetas por el disco solar cada vez que se encontrasen en conjunción inferior, pero como orbitan en diferentes planos se requiere además que durante la conjunción inferior el planeta pase por uno de los nodos[20] de la órbita.

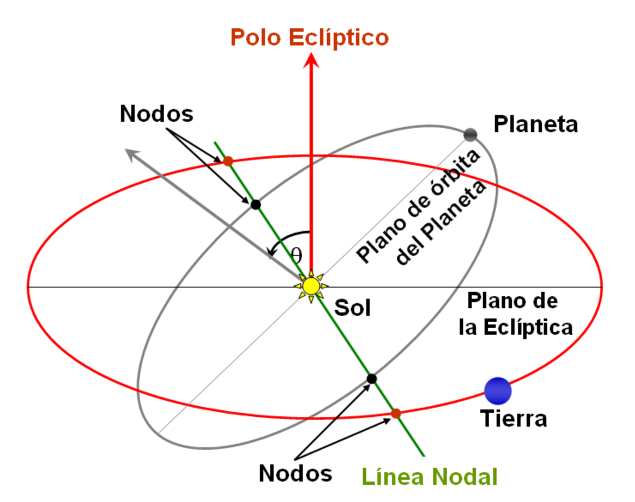


Figura 2.30: Debido a que el plano de órbita de los planetas forma una ángulo con el de la eclíptica, es necesario para la ocurrencia del tránsito que el planeta se encuentre en conjunción inferior y además que se encuentre en los nodos de la órbita. Observe que hemos usado el modelo Heliocéntrico.

[20]Los nodos son dos puntos opuestos, sobre la esfera celeste, donde la trayectoria de un planeta intersecta la eclíptica.

Los tránsitos son de gran importancia, ya que han permitido calcular la distancia Tierra-Sol conocida como *unidad astronómica*, y con ésta, las dimensiones del sistema solar usando la tercera ley de Kepler (que estudiaremos en el Capítulo 3). El primer astrónomo que se dio cuenta de las posibilidades de estos cálculos fue *Edmund Halley* (1656 - 1742).

También los satélites efectúan tránsitos sobre el disco del planeta. Son muy conocidos los tránsitos y ocultaciones de los satélites de Júpiter, o la proyección de sus sombras sobre el disco del planeta (ver figura 1.2). Aparte de los satélites galileanos, sólo la sombra de Titán es lo suficientemente grande para ser observada sobre la atmósfera del planeta Saturno por la mayoría de los telescopios.

2.8.1. Tránsito de Mercurio

Se produce cuando Mercurio pasa entre la Tierra y el Sol. Mercurio se mueve en un plano que forma 7° con el de la eclíptica, la Tierra atraviesa cada año la línea de los nodos de la órbita de Mercurio entre el 8 y 9 de mayo y el 10 y 11 de noviembre; si para esa fecha ocurre además la conjunción inferior, entonces se producirá un tránsito. Para que esto se repita se requiere que transcurra algún múltiplo del período sinódico (116 días). Mercurio suele transitar el disco solar en promedio unas 13 veces por siglo en intervalos de 3, 7, 10 y 13 años, aunque no necesariamente en ese orden.

El diámetro angular de Mercurio varía entre 4,7 y 12,9 segundos de arco, frente a los 1890 segundos de arco que tiene el Sol en promedio, sin embargo, se requiere de un instrumento de aumento, como un telescopio o binoculares para poder observarlo puesto que el ojo humano no es capaz de resolver objetos bajo los 20 segundos de arco[21]. Así, la primera observación de un tránsito ocurre en la era post-telescopio, el 7 de noviembre de 1631, y aunque fué predicho por *Johannes Kepler* (1571 - 1630), fue observado con éxito por *Pierre Gassendi* (1592 - 1655).

Los tránsitos de Mercurio para la primera mitad del presente siglo son:

1. 7 de mayo de 2003
2. 8 de noviembre de 2006
3. 9 de mayo de 2016
4. 11 de noviembre de 2019
5. 13 de noviembre de 2032
6. 7 de noviembre de 2039
7. 7 de mayo de 2049

[21] El ángulo de resolución es directamente proporcional a la longitud de onda (λ) e inversamente proporcional a la abertura de la pupila (D). Si el resultado lo queremos en segundos de arco, la constante de proporcionalidad vale: $2,5 \cdot 10^5$.

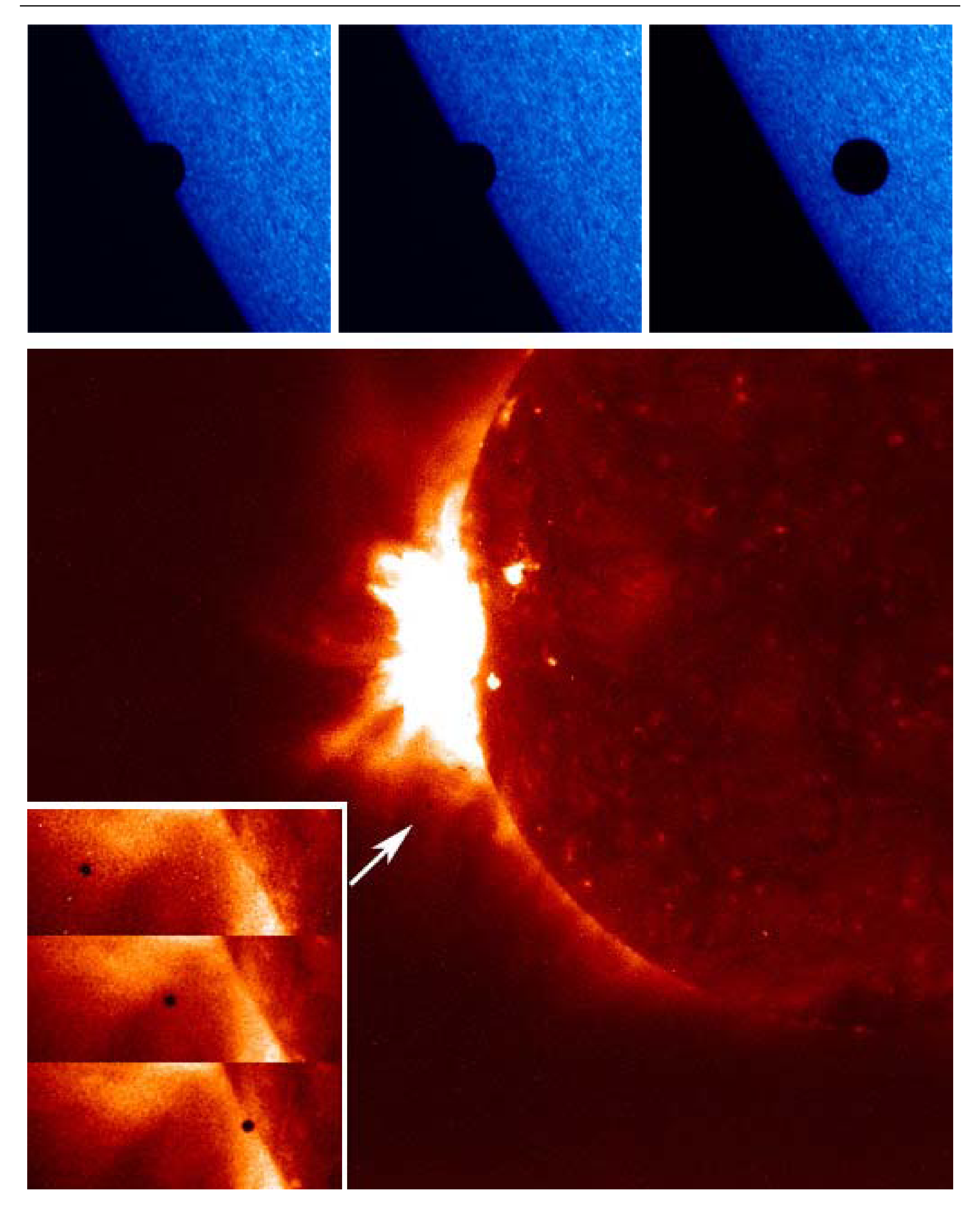


Figura 2.31: Imágenes del Tránsito de Mercurio del 08 de Noviembre de 2006 tomadas con el Hinode, el observatorio espacial solar de la Agencia Espacial Japonesa. Arriba tres imágenes de Mercurio entrando en el disco solar tomadas con el SOT (Solar Optical Telescope). Abajo imágenes en rayos X tomadas con el telescopio XRT (X-Ray Telescope). Se observa a Mercurio junto con una gigantesca masa de plasma, con temperaturas de cerca de un millón de grados, atrapada en el campo magnético de una mancha solar. El tamaño angular de Mercurio fue de casi 10". Créditos: NAOJ/JAXA.

2.8.2. Tránsito de Venus

Se produce cuando Venus pasa entre la Tierra y el Sol. Venus se mueve en un plano que forma 3,394° con el de la eclíptica, la Tierra atraviesa cada año la línea de los nodos de la órbita de Venus a principios de junio y diciembre, si para esa fecha ocurre además la conjunción inferior, entonces se producirá un tránsito.



El tránsito de Venus es mucho más espectacular que su símil de Mercurio, debido a que el tamaño relativo de Venus es mayor (entre los 59 y 62 segundos de arco) y que dura más tiempo. Dependiendo de la zona de tránsito del disco solar, puede durar hasta varias horas.

La periodicidad de tránsitos es mucho menor que los de Mercurio: ocurren 4 tránsitos en un período de 243 años, con un intervalo entre un tránsito y el siguiente de 105,5; 8; 121,5 y 8 años, aunque no necesariamente ese orden se mantiene, ni estos intervalos son absolutos, ya que también varían con el tiempo. Se suelen considerar los "pares" de tránsitos que se producen en un intervalo de 8 años.

Los tránsitos de Venus para los siglos XXI y XXII son:

1. 8 de junio de 2004
2. 6 de junio de 2012
3. 11 de diciembre de 2117
4. 8 de diciembre de 2125

2.9. Paralaje

La *paralaje* (del griego $\pi\alpha\rho\alpha\lambda\lambda\alpha\xi\iota\varsigma$, cambio, diferencia) es la desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo de la posición del observador. Podemos evidenciar la paralaje cuando observamos con uno de nuestros ojos, y cubriendo un objeto con uno de nuestros dedos con el brazo extendido, si cambiamos ahora el ojo de observación, veremos que ya nuestro dedo no oculta el objeto (ver figura 2.33).

Nuestras observaciones son realizadas desde la superficie terrestre, en astronomía geocéntrica es útil definir la *paralaje geocéntrica o diurna* que corresponde a la diferencia entre la dirección de un cuerpo celeste, visto desde un punto de la superficie de la Tierra (topocéntrica) y la misma dirección de ese astro visto desde el centro de la Tierra (geocéntrica).





Figura 2.33: Ocultación de un objeto lejano por el dedo pulgar de un observador que cubre uno de sus ojos. Al alternar el ojo cubierto, queda en evidencia que la proyección contra el fondo lejano difiere en un cierto ángulo denominado paralaje.

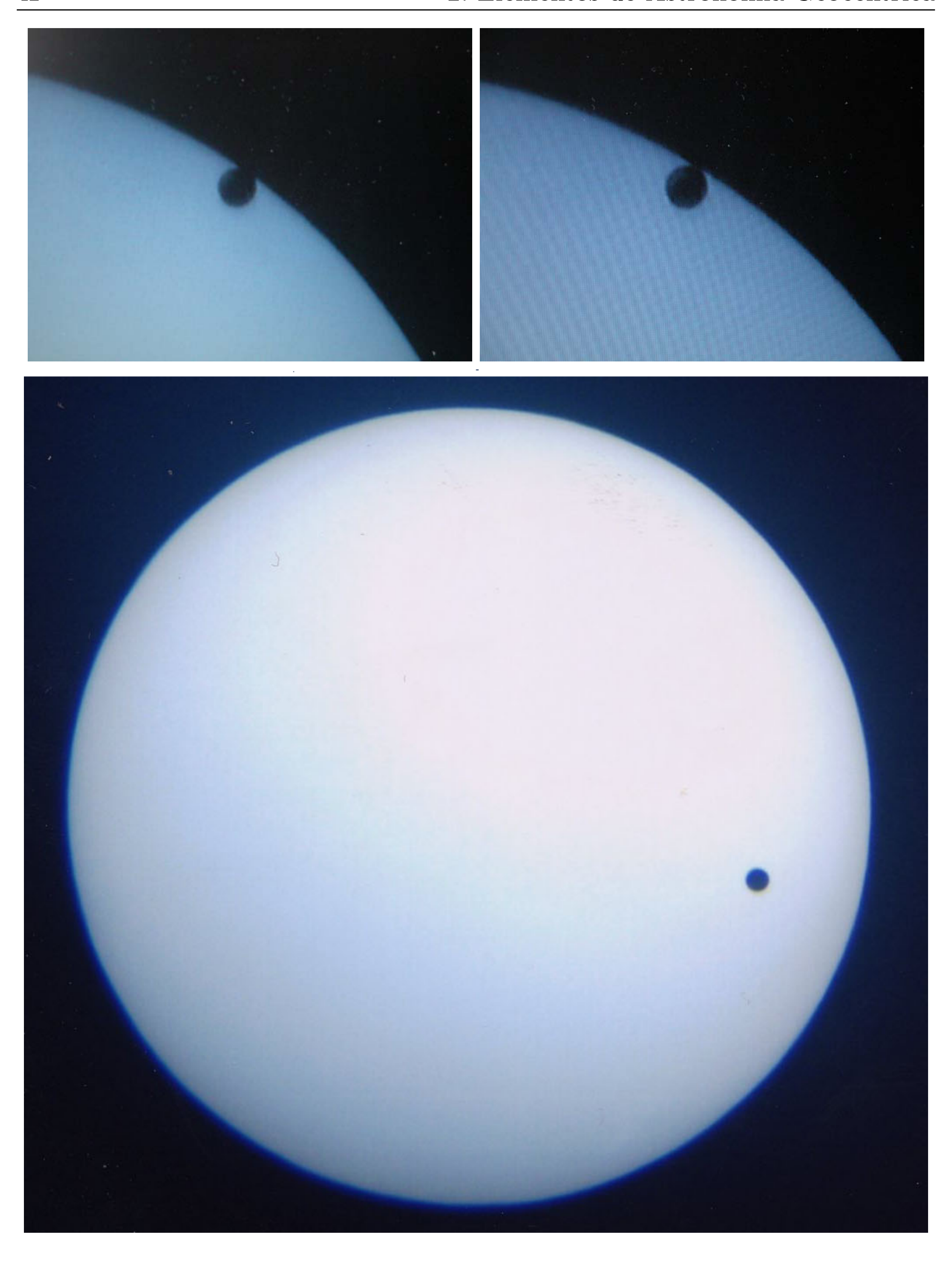


Figura 2.32: Tránsito de Venus del 08 de Junio de 2004. Fotografías tomadas por socios de la Associazione Ligure Astrofili POLARIS de Génova.

Desde el punto de vista heliocéntrico, la Tierra cambia de posición continuamente en su movimiento orbital, así una estrella cercana posee una paralaje medible. Se denomina *paralaje anua* al cambio angular de un astro respecto de las estrellas fijas de fondo, tomando como línea de base el eje mayor de la elipse que describe en su movimiento anual (figura 2.34). Se forma entonces un triángulo rectángulo con el radio máximo de la órbita terrestre como cateto de base, donde la hipotenusa es la línea dirigida al astro desde la Tierra.

La paralaje anua sirve para definir una nueva unidad de distancia, el *parsec*[22]. Una estrella dista a un parsec del Sol, si tiene una paralaje de 1 segundo de arco (figura 2.35), esto corresponde a una distancia de 3,26 años-luz.

La estrella más próxima al Sol, *Próxima Centauri* del sistema triple *Alfa Centauri*, tiene una paralaje de 0,765", correspondiente a 1,31 [pc] o 4,3 años-luz.

Conociendo la paralaje (π) de una estrella en segundos de arco podemos calcular su distancia en parsecs:

$$d\ [pc] = \frac{1}{\pi\,[\,"]}$$

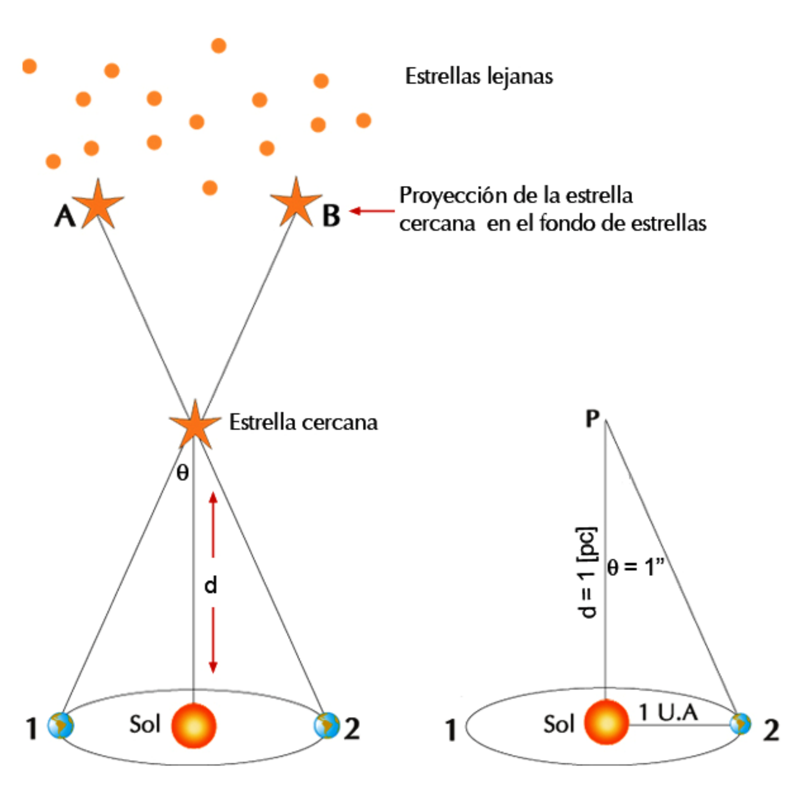


Figura 2.34: (Izquierda) El ángulo θ en la configuración mostrada corresponde a la paralaje anua.

Figura 2.35: (Derecha) El Parsec es una unidad de distancia definida en función del radio órbita terrestre y una paralaje estelar de un segundo de arco.

por lo que en astronomía suele emplearse este término para referirse a la distancia a las estrellas. Por ejemplo, la paralaje de Antares es de 0,007", que corresponde a una distancia de 144 [pc] o 469 años-luz.

Las paralajes estelares están todas por debajo del segundo de arco. A mayor distancia, menor paralaje (son inversamente proporcionales), y los errores se vuelven más significativos, de modo que a partir de 100 años luz ya no es fiable la paralaje anua para determinar distancias estelares. Para aumentar la precisión de las mediciones es preciso nueva tecnología que debe ser puesta fuera de nuestra atmósfera, un ejemplo de esto fue la misión *Hipparcos* (acrónimo del inglés *The High Precision Parallax Collecting Satellite*) de la Agencia Espacial Europea (ESA) cuya misión fue medir entre 1989 y 1993 la paralaje de más de 2.5 millones de estrellas que se encontraban hasta unos 150 [pc] de la Tierra. Los resultados se publicaron en forma de un catálogo estelar conocido como *Catálogo Tycho*.

[22] Del inglés *parallax of one second of arc*, paralaje de un segundo de arco.

2.10. Un Poco de Historia

El estudio de los tránsitos de Mercurio entre 1631 hasta mediados del siglo XIX, le permitieron a *Urbain Le Verrier* (1811 - 1877) descubrir el avance del perihelio de Mercurio, que sería un fenómeno no predicho por la teoría de la gravitación de Newton.

Johannes Kepler fue el primero en predecir el tránsito de un planeta: Venus. Sus cálculos predijeron tránsitos en 1631 y 1761, pero el tránsito de 1631 no fue observado ya que, prácticamente en toda Europa, tuvo lugar después de la puesta del Sol. Sin embargo, el pastor protestante inglés *Jeremiah Horrocks* (1617 - 1641), que había estudiado astronomía y matemáticas, recalculó la trayectoria de Venus, descubriendo que habría otro tránsito ocho años más tarde del predicho por Kepler; el 4 de diciembre de 1639. Ese día fue un domingo y después de cumplir con sus labores en la iglesia del pueblo de Hoole, observó el tránsito. También a instancias de Horrocks, William Crabtree observó el tránsito desde su casa en Saldford. Las observaciones de Horrocks permitieron deducir un valor de 14 segundos para la paralaje, lo que corresponde a 95 millones de kilómetros para la unidad astronómica.

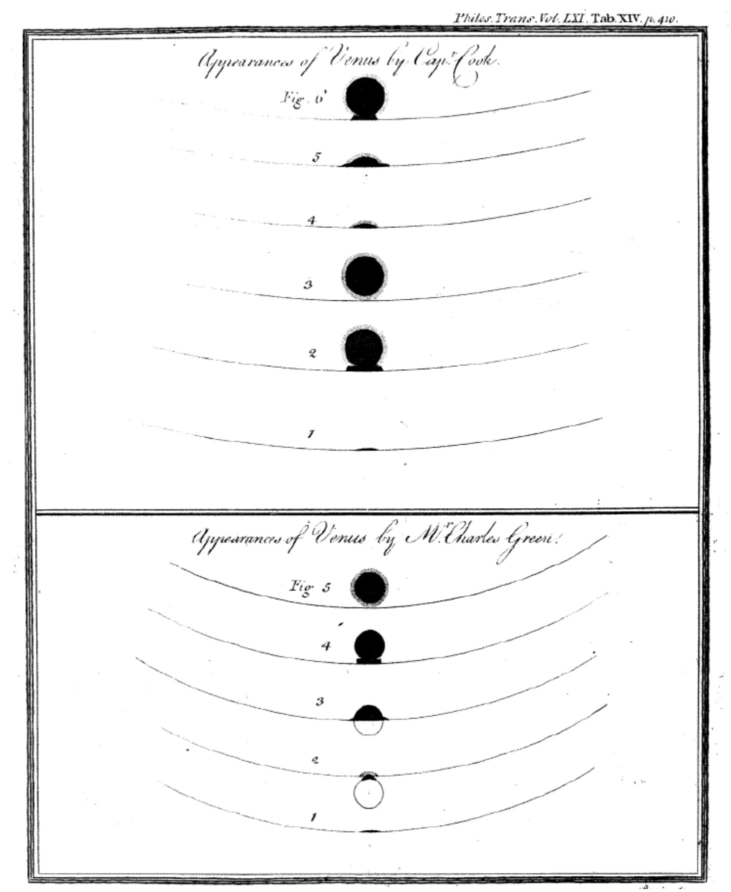


Figura 2.36: Dibujos del tránsito de Venus del capitán James Cook y Charles Green hechos por encargo de la Royal Society. Se observa el efecto de la gota negra. Fuente: Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 61, p. 410, 1771.

En 1716 el astrónomo inglés Edmund Halley envió un artículo a la *Royal Society* proponiendo un nuevo método para calcular la unidad astronómica usando la paralaje en el tránsito de Venus. De esta forma, en 1761 astrónomos de distintos países, comisionados por sus gobiernos emprendieron la tarea de observar el tránsito desde distintas ubicaciones geográficas: los británicos enviaron una expedición a Santa Helena y otra a Sumatra, los franceses enviaron cuatro expediciones, una a Siberia, una a Viena, una a la Isla Rodríguez y otra a Pondicherry en la India. Esta última volvió sin conseguir su objetivo debido a la guerra existente entre ingleses y franceses. En total, el tránsito fue observado desde unos 70 lugares distribuidos alrededor del mundo, constituyendo la primera gran empresa científica internacional. Sin embargo, pese a la gran cantidad de observadores, los resultados obtenidos no estuvieron acordes con las expectativas, ya que por una parte el mal tiempo en algunos lugares de observación, la dificultad de determinar con la precisión necesaria la localización geográfica del lugar de la observación,

y sumado al efecto de la gota negra[23], hicieron muy difícil la aplicación del método de Halley.

Para el siguiente tránsito, el 3 de junio 1769, hubo 150 observadores oficiales y otros muchos aficionados. Entre los cuales se encontraba la expedición organizada por la Royal Society a cargo del célebre capitán James Cook. Las observaciones fueron realizadas por el astrónomo Joseph Banks desde dos observatorios construídos en punta Venus, bahía de Matavai en la isla de Tahití. Pese a las dificultades pudo determinarse la distancia Tierra-Sol con un error inferior al 10 %.

Posteriormente, en 1835, *Johann Franz Encke* (1791 - 1865), director del observatorio de Berlín, obtuvo a partir de los datos obtenidos en los tránsitos de 1761 y 1769 un valor de la paralaje de 8,57 segundos de arco que corresponde a una distancia Tierra-Sol de 153,5 millones de kilómetros. El valor medido actualmente para la paralaje solar de 8,79 segundos de arco, lo cual implica una distancia Tierra-Sol de 149,58 millones de kilómetros.

2.11. Ocultaciones

Una ocultación, es el paso de un cuerpo celeste frente a otro de menor tamaño relativo. El caso de mayor relevancia, sin el uso de un telescopio, es la ocultación de estrellas y planetas por la Luna. Ésta en su movimiento por la bóveda celeste oculta estrellas o planetas, que desaparecen tras el limbo lunar, para reaparecer poco tiempo después. Las ocultaciones estelares por la Luna permiten determinar, a través de la paralaje, la diferencia de longitud geográfica entre dos lugares en los que se observa una misma ocultación estelar.



Figura 2.37: Fotografía composición a partir de dos fotografías tomadas a la misma hora (01h20m UT) pero de lugares separados unos 7.200 [km] (Divide, Colorado - EEUU y Maldon, Essex - Inglaterra). Se aprecia la paralaje lunar. Créditos: Lunar Parallax Demonstration Project.

2.12. Eclipses

Un eclipse (del griego ἔκλειψις, desaparición) es un evento en el que la luz procedente de un cuerpo es bloqueada por otro.

Los eclipses de Sol y de Luna pueden ocurrir solamente cuando el Sol y la Luna se alinean con la Tierra. Si el plano de órbita de la Luna coincidiera con el de la eclíptica, en cada *novilunio* (Luna nueva) tendríamos la ocurrencia de un eclipse de Sol, de la misma forma cada *plenilunio* (Luna llena) un eclipse de Luna, pero el plano de órbita de la Luna está inclinado respecto al de la eclíptica un ángulo de 5° 08' 13", por lo cual la mayoría de las ocasiones la Luna pasa sobre o debajo del disco solar o sobre o bajo del cono de sombra de la Tierra sin que ocurran eclipses.

[23] Efecto óptico que se observa cuando Venus está cerca del limbo del Sol, aparece una sombra de unión entre ambos.

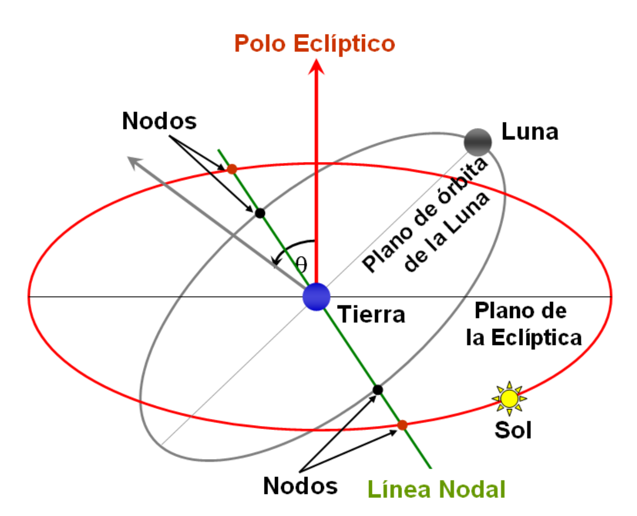


Figura 2.38: El plano de órbita de la Luna se encuentra inclinado respecto del plano de la Eclíptica, así solo se producirá un eclipse cuando el Sol y la Luna se encuentren cerca de los nodos de la órbita lunar.

De esta forma, solo se producirá un eclipse cuando el Sol y la Luna se encuentren cerca de los nodos de la órbita lunar. Si la Luna esta muy cerca del nodo durante la sizigia[24], o su latitud no excede de un determinado valor ocurre un eclipse total.

El Sol tarda 173,31 días (unos 5 meses tres semanas) en trasladarse de un nodo al siguiente y después de 346,62 días vuelve a pasar por un mismo nodo, estos períodos son llamados *estación* y *año de eclipses* respectivamente. En un mes lunar el Sol se desplaza respecto al nodo:

$$\frac{360°}{11{,}738} = 30{,}67° \quad \text{donde} \quad 11{,}738 = \frac{346{,}62}{29{,}5306}$$

por ello, el lento paso del Sol a través de un nodo va acompañado necesariamente de al menos un eclipse de Sol. Aunque lo común es que se produzcan dos eclipses con 15 días de intervalo, uno en cada nodo, uno de Sol y otro de Luna en cualquier orden. De esta forma, comúnmente ocurren dos pares de eclipses al año, un par por cada paso nodal, aunque ocasionalmente, pueden ocurrir hasta tres eclipses en un mismo paso por un nodo.

Un año civil incluye tres estaciones de eclipses, aunque generalmente sólo una será completa, cada cierto número de años, un año civil puede incluir dos estaciones de eclipses completas. Los 18,61 días restantes podrían estar repartidos en dos estaciones de eclipses diferentes. En este caso, en un mismo año el Sol pasa tres veces por sus nodos, pudiendo ocurrir hasta siete eclipses en las siguientes posibilidades:

- 5 eclipses de Sol y 2 eclipses de Luna
- 5 eclipses de Luna y 2 eclipses de Sol
- 4 eclipses de Sol y 3 eclipses de Luna
- 4 eclipses de Luna y 3 eclipses de Sol

La última vez que hubieron siete eclipses en un mismo año fue 1982, año que excepcionalmente los tres eclipses lunares fueron totales. Esta situación no volverá a repetirse hasta el año 2485.

Analicemos dos situaciones particulares la ocurrida el año 2002 y la que ocurrirá el año 2011:

- El año 2002 hubo, como es común, dos pasos del Sol por sus nodos, en el primer paso a mitad de año, hubieron dos eclipses penumbrales de Luna y uno anular de Sol, en el paso por el segundo nodo a finales de año hubieron un eclipse total de Sol y uno penumbral de Luna, de esta forma este año no se produjo ningún eclipse total o parcial de luna.

[24]Sizigia (del griego $\sigma\upsilon\zeta\upsilon\gamma\acute{\iota}\alpha$, unión) es la conjunción u oposición de la Luna con el Sol.

- El año 2011 el Sol pasará tres veces por sus nodos en un mismo año. A comienzos de año habrá un eclipse parcial de Sol, a mitad de año, y en el otro nodo se producirán dos eclipses parciales de Sol y un eclipse total de Luna, finalmente, a fines de año cuando el Sol vuelva a pasar por el otro nodo ocurrirá un eclipse parcial de Sol y un eclipse total de Luna.

Para que vuelva a ocurrir un eclipse homólogo, se requerirá que coincida un múltiplo entero de meses sinódicos (para que vuelva a haber luna llena o nueva) y un múltiplo entero de 346,62 días (para que vuelva a pasar por el mismo nodo). Esto ocurre al cabo de 223 meses sinódicos o 6585,5 días, es decir, 18 años y 11,3 días. Este período se le denomina *período Saros*. Aunque el eclipse es homólogo, lo es respecto de la esfera celeste, pues dado que el período saros no posee un número enteros de días, el eclipse no ocurrirá en el mismo lugar sobre la superficie de la Tierra. El tercio de día corresponderá a un tercio de 360 grados, es decir, el eclipse ocurrirá unos 120 grados hacia el Oeste.

Dado que los eclipses siempre ocurren en la zona de la trayectoria lunar cercana a la trayectoria del Sol, da el nombre de ésta última, *la eclíptica*.

Los eclipses no son posibles en Mercurio y Venus, debido a que carecen de satélites. Los planetas gaseosos, poseen muchos satélites que, vistos a través del telescopio, muestran frecuentemente sombras proyectadas sobre las nubes de las atmósferas. Los más destacados afectan a Júpiter, cuyos cuatro grandes satélites y su bajo eje de inclinación, hacen los eclipses (u ocultaciones) frecuentes.

Plutón y su satélite Caronte, en ciertas zonas de su órbita producen, vistos desde la Tierra, eclipses mutuos.

2.12.1. Eclipse Solar

El tipo de tránsito más conocido, es el eclipse solar, en el que la Luna transita por el disco solar, su espectacularidad se debe a que los tamaños aparentes de la Luna y el Sol son casi idénticos. Esto último se debe a una extraordinaria coincidencia que existe en nuestra época, y es la siguiente: el diámetro del Sol es aproximadamente 400 veces el de la Luna y por otra parte, la distancia Tierra-Sol actualmente es unas 390 veces la distancia Tierra-Luna.

En Marte, por ejemplo, ninguno de sus satélites tiene el tamaño suficiente para cubrir completamente el disco solar, ni tampoco forma esférica, por lo cual realizan solo tránsitos sobre el disco solar (figura 2.39).

Un eclipse solar sólo puede ocurrir durante la luna nueva, debido a que la Luna se encuentra en conjunción inferior. Para que al menos la penumbra lunar alcance la Tierra, la Luna debe encontrarse a una separación (perpendicular) máxima de $\pm 1°$ 35' de la eclíptica, y para que la umbra lunar alcance la Tierra, la Luna debe situarse a una separación (perpendicular) máxima de $\pm 1°$ 03' de la eclíptica, aunque esto varía ligeramente dependiendo de la distancia Tierra-Luna. Debido a esto, para que ocurra un eclipse, la Luna debe situarse a lo más 18° 31' del nodo. Si se encuentra entre los 18° 31' y los 11° 15' ocurrirá un eclipse parcial, si se encuentra entre los 11° 15' y los 9° 55' del nodo puede ser parcial o total, y si se encuentra a menos de los 9° 55' el eclipse será total.

Hay dos tipos de eclipses totales de Sol, el total y el total anular.

Eclipse Parcial: Ocurre para las zonas de la superficie terrestre que son tocadas por la penumbra, por lo cual, visto desde la Tierra, la Luna no cubre por completo el disco

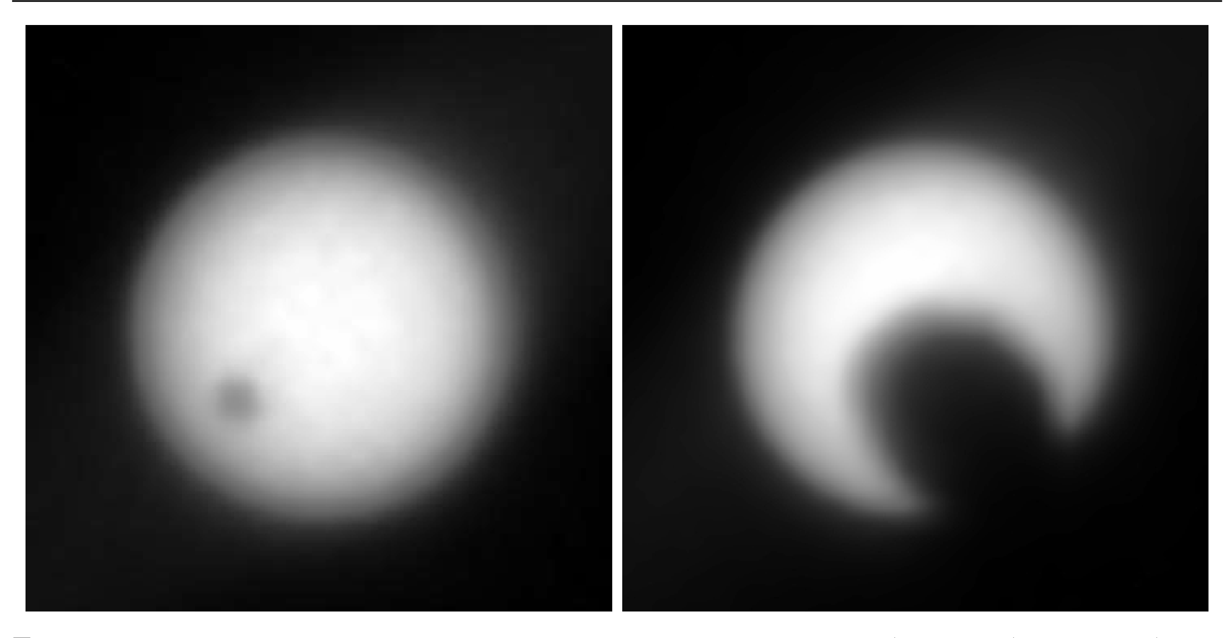


Figura 2.39: Imágenes de tránsitos sobre el disco solar de Deimos (izquierda) y Fobos (derecha) vistos desde la superficie marciana. Créditos: Opportunity Mars Exploration Rover Mission NASA/JPL/Cornell.

solar. En una gran franja de la superficie terrestre, los observadores pueden observar el eclipse en forma parcial, aunque solo de una delgada franja al interior de esta, donde el cono de sombra intercepta a la Tierra (si es que lo hace) en la llamada banda de totalidad, se podrá observar la fase de totalidad.

Eclipse Total: Ocurre cuando la Luna cubre totalmente al disco solar. Esto solo ocurre en la banda de totalidad, fuera de ella el eclipse es parcial. Se verá un eclipse total para los observadores situados en la Tierra que se encuentren dentro del cono de sombra lunar o umbra, cuyo diámetro máximo sobre la superficie de nuestro planeta no superará los 270 [km], la rotación de la Tierra se encarga de que esta zona se vaya desplazando por la superficie de la Tierra de Oeste a Este, a unos 3.200 [km/h], generando la banda de totalidad.

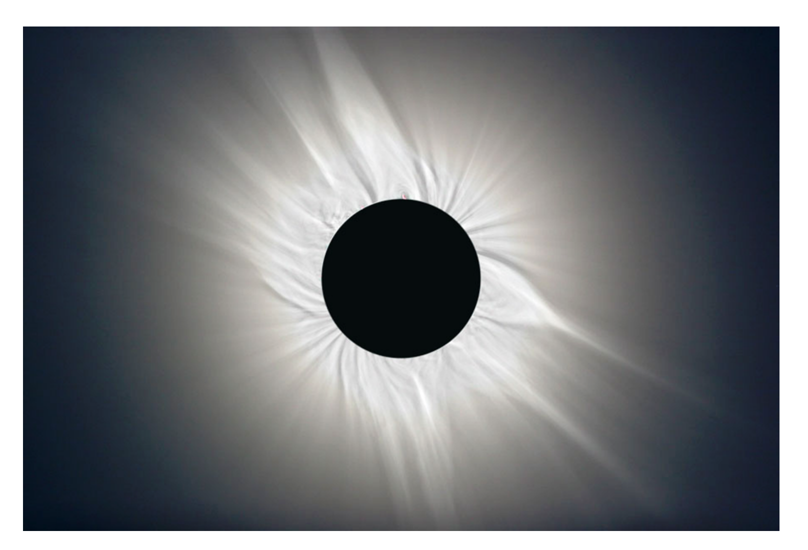


Figura 2.40: Durante un eclipse total de Sol se puede observar una zona que rodea al disco solar llamada la Corona. Créditos: Koen van Gorp.

La fase de totalidad puede durar entre 2 y 7,5 minutos, alcanzando algo más de las 2 horas todo el eclipse. En promedio sucede un eclipse total de Sol en el mismo punto terrestre una vez cada 200 - 300 años.

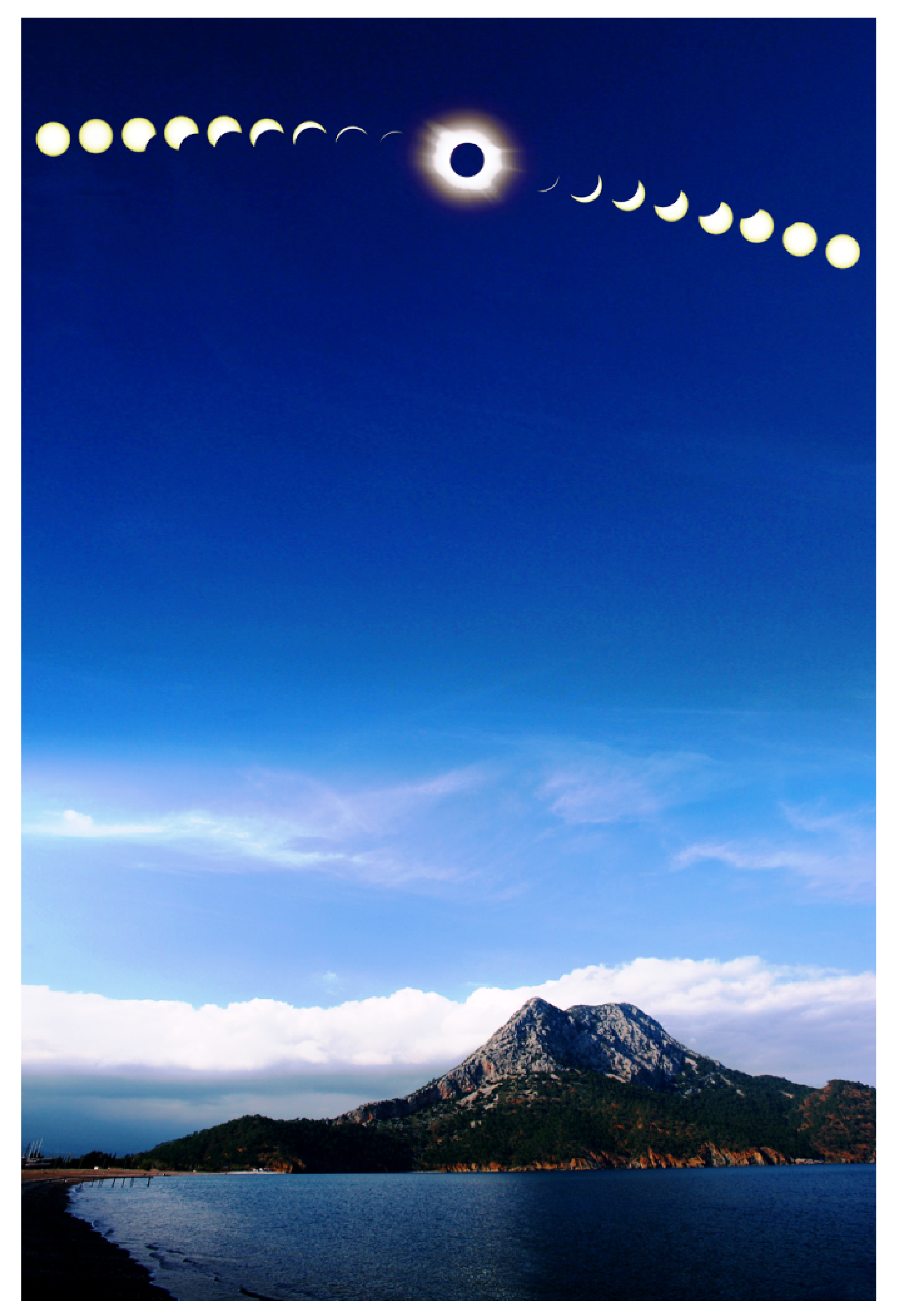


Figura 2.41: Superposición de imágenes tomadas durante el eclipse total de Sol del 29 de marzo de 2006 en Adrasan - Turquía. Se puede observar claramente que la fase de totalidad del eclipse ocurre en la intersección de las trayectorias de ambos astros sobre la bóveda celeste (el nodo). Créditos: Stefan Seip.



Eclipse Total Anular: Ocurre bajo las mismas condiciones del eclipse total, pero además la Luna se encuentra cerca del *apogeo*, por lo cual, su diámetro angular es menor que el solar, de manera que en la fase máxima, permanece visible un anillo del disco del Sol. Esto ocurre en la banda de anularidad, fuera de ella el eclipse es parcial. La duración máxima de la fase de totalidad anular puede llegar a 12 minutos y durando más de 4 horas todo el fenómeno, teniendo la franja de totalidad un ancho máximo de 272 [km] y una longitud máxima de 15.000 [km].



Figura 2.42: Eclipse anular de Sol del 03 de Octubre de 2005, fotografías tomadas con una cámara digital Kodak CX7430 desde la Universidad Complutense de Madrid. La imagen de la Izquierda (12:24:18 hora local) y la del centro (12:38:02) fueron tomadas en fase de parcialidad y la de la derecha (12:58:20) en la fase de totalidad. Créditos: Isaías Rojas.

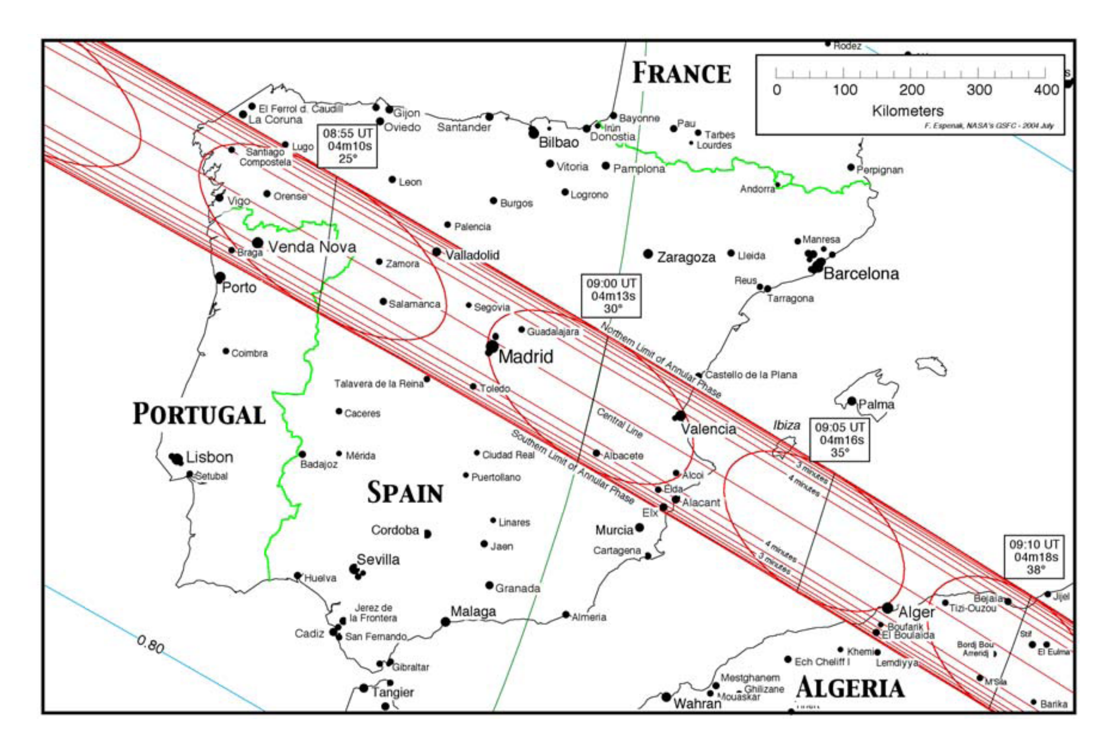


Figura 2.43: Banda de totalidad del eclipse anular de Sol del 03 de octubre de 2005.

En la zona eclipsada de la Tierra, la falta de radiación solar directa produce una serie de fenómenos:

- Disminución de la temperatura, por ejemplo en el eclipse anular de Octubre de 2005, en Madrid se estimó que la temperatura descendió 11 °C en la fase de totalidad.

- Vientos producidos por la diferencia de temperaturas entre la zona eclipsada y no eclipsada.
- En la fase de totalidad, se puede apreciar todo el horizonte iluminado alrededor del observador produciendo una bella y extraña sensación.
- Aparición de “extrañas” sombras en el suelo (ver figura 2.44).
- En el mundo animal, los cazadores nocturnos salen de caza durante la fase de totalidad y los animales diurnos regresan a sus madrigueras.



Figura 2.44: Imagen de “extrañas” sombras que se pueden ver en el suelo durante un eclipse total, estas se producen debido a varios fenómenos ópticos como la dispersión, que favorecen la formación de estas extrañas sombras. Imagen tomada por Marina Mucci en la expedición del 29 de marzo del 2006 a Turquía de la Associazione Ligure Astrofili POLARIS de Génova.

Recomendaciones para Observar un Eclipse Solar

Un eclipse solar es un fenómeno llamativo, y muchas personas tratan de observarlo; justamente por esto es esencial no poner en riesgo los ojos del observador. La observación directa del Sol puede provocar quemaduras en la retina. *Nunca debe mirarse directamente al Sol, ni menos observarse a través de binoculares o telescopios*, ya que puede producir quemaduras graves e irreversibles en la retina.

Solo se puede observar sin comprometer la vista del observador, a través de un filtro específicamente construído para tal efecto o anteojos especiales, garantizados por el fabricante. Los filtros caseros o anteojos comunes no deben utilizarse nunca por el peligro

que conllevan para los ojos del observador, tampoco se debe usar radiografías, diskettes desarmados, películas veladas, anteojos oscuros, vidrios de colores o cristales ahumados con una vela, ya que ellos permiten el paso de radiación no visible como rayos ultravioleta.

La única forma segura de observación del Sol es la indirecta, que además permite en muchos casos observar algunos detalles de la superficie solar. Algunas formas de observación indirecta son:

- *Proyección a través de un agujero:* con un alfiler o aguja se perfora un diminuto agujero en una hoja de cartón. Se hace pasar la luz solar a través del agujero y se proyecta sobre un papel o una superfice lisa.
- *Proyección con binoculares:* se cubre uno de los lentes del binocular y se hace pasar la luz del Sol a través del lente descubierto.
- *Proyección con telescopio:* se hace pasar la luz del Sol a través del telescopio y se proyecta sobre una superficie lisa. Es recomendable, por protección del instrumento, utilizar los lentes de menor aumento, ya que producen imágenes más grandes y menos calentamiento.



Figura 2.45: (Izquierda) La proyección del Sol en una pantalla es la forma más segura de observar el Sol. En la fotografía el tránsito de Venus (Génova 2004).

Figura 2.46: (Derecha) El Sol se puede observar directamente sólo a través de un filtro específicamente construído para tal efecto, como los anteojos especiales de la fotografía.

2.12.2. Eclipse Lunar

Un eclipse lunar ocurre cuando el planeta Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, es decir, cuando la Luna entra en la zona de sombra de la Tierra. Desde el punto de vista de un observador Lunar, la Tierra oculta al Sol, de forma que esto sólo puede ocurrir durante la Luna llena.

La Tierra es un cuerpo cuyo radio ecuatorial es de 6.378 [km], que al ser iluminado por el Sol (cuyo radio es de 695.500 [km], es decir, 109,05 veces mayor) proyecta un cono de sombra convergente (umbra) y un cono de penumbra divergente, determinados por

las tangentes interiores y exteriores, respectivamente, comunes al Sol y a la Tierra. La distancia promedio entre la Tierra y el Sol es de 149,6 millones de kilómetros.

La Luna tiene un radio de 1.736,6 [km] y gira alrededor de la Tierra a una distancia media de 384.403 [km] (60,27 radios ecuatoriales terrestres). La altura del cono de umbra es de 1.384.584 [km] (217 radios ecuatoriales), esto es mayor que la distancia Tierra-Luna, por lo que se pueden producir eclipses.

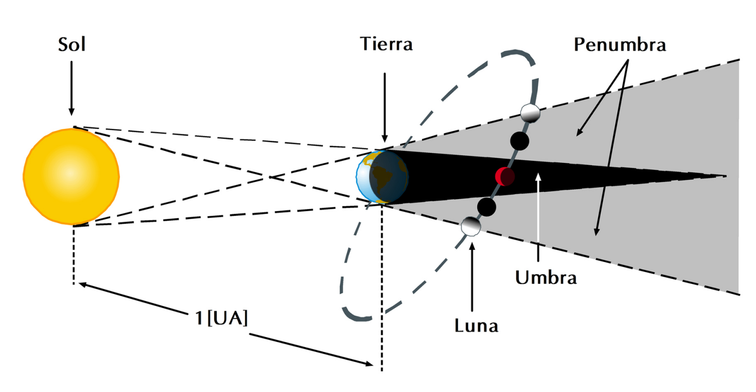


Figura 2.47: Cono de sombra convergente (umbra) y un cono de sombra divergente (penumbra). La figura no está a escala.

A los 384.403 [km] la umbra tiene un diámetro de 9.213 [km], esto es, 2,65 veces el diámetro de la Luna.

Existen tres tipos de eclipses lunares:

Total: se produce cuando la Luna penetra completamente en el cono de sombra (umbra) proyectado de la Tierra en el espacio. La duración de un eclipse total de Luna puede llegar a 1 hora y 47 minutos como máximo.

Parcial: se produce cuando la Luna penetra solo parte del cono de sombra proyectado por la umbra de la Tierra en el espacio, de forma que en este tipo de fenómenos, sólo una parte de la superficie lunar será eclipsada, y por lo tanto se oscurecerá, mientras el resto conserva su luminosidad.

Penumbral: se produce cuando la Luna se encuentra parcial o totalmente dentro de la corona penumbral que rodea a la zona de sombra.

El tipo de eclipse lunar no depende de la ubicación geográfica del observador, ya que es igualmente visible mientras la Luna sea visible para el observador.



Figura 2.48: Eclipse total de Luna del 4 de abril de 1996, Bardenas Reales de Navarra (España). Imagen J.C. Casado © tierrayestrellas.com.

La magnitud de un eclipse lunar depende del porcentaje de superficie que sea eclipsada por la umbra, así por ejemplo si el porcentaje eclipsado es del 75 %, se dirá que la magnitud del eclipse es de 0,75. Para un astronauta (o

cosmonauta) que estuviera situado sobre la superficie de la Luna, un eclipse penumbral correspondería eclipse parcial de Sol. Análogamente, si el astronauta se encontrara dentro del cono de sombra de la Tierra no podría ver el Sol; para él se estaría produciendo un eclipse total de Sol, en realidad una ocultación, ya que el tamaño aparente del Sol (32') es menor que el de la Tierra (1.9°).

La atmósfera terrestre tiene una gran influencia en como visualizamos los eclipses. Si la atmósfera no existiese, en cada eclipse total de Luna, ésta desaparecería completamente, cosa que sabemos que no ocurre. La Luna totalmente eclipsada adquiere un color rojizo característico debido a la luz dispersada por la atmósfera de la Tierra.



Figura 2.49: En la fase de totalidad, la Luna se observa enrojecida en vez de oscurecida, debido a efectos de difracción de la luz que pasa a través de la atmósfera terrestre. Créditos & copyright: Johannes Schedler.

2.12.3. Un Poco de Historia

Los eclipses de Sol y Luna han sido de gran relevancia para el desarrollo del conocimiento astronómico.

Los eclipses más antiguos fueron registrados en el año 2137 a. de C. en China y en el año 1063 a. de C. en Babilonia.

Los caldeos fueron los que descubrieron el período Saros que les permitió predecir eclipses.

Aristarco de Samos (310 - 230 a. de C.) determinó por primera vez la distancia Tierra-Luna mediante un eclipse total de Luna. Hiparco descubrió la *precesión de los equinoccios* basándose en eclipses lunares totales cerca de los equinoccios y en antiguas tablas para el Sol, y mejoró la determinación de la distancia de la Tierra-Luna realizada por Aristarco. Kepler propuso usar los eclipses de Luna como una señal absoluta para medir la longitud geográfica de un lugar sobre la Tierra.

Hacia 1700 los astrónomos llegan a la conclusión de que los eclipses observados por chinos, caldeos y árabes eran incompatibles con la duración del día actual, por lo cual el día se había alargado 1,45 milésimas de segundo cada siglo. Como veremos en el Capítulo

3, esto es una consecuencia de las fuerzas de mareas.

Durante el siglo XX *Arthur Eddington* (1882 - 1944) logró observar que la luz de estrellas que se encuentran justo detrás, o en las cercanías del Sol, en la esfera celeste, sufren pequeños desplazamientos. Esto fue predicho teóricamente por *Albert Einstein* (1879 - 1955) en 1913 cuando trabajaba en el desarrollo de la teoría de la Relatividad General.

2.13. Las Estaciones del Año

El paso de un año se puede evidenciar por el ciclo de las estaciones. Las estaciones son períodos en los que ciertas condiciones climatológicas en una misma región se mantienen, dentro de un cierto rango. Estos períodos duran aproximadamente tres meses y se denominan invierno, primavera, verano y otoño, aunque en las regiones de la Tierra cercanas al ecuador las estaciones son sólo dos, la estación seca y la lluviosa ya que en ellas varía drásticamente el régimen de lluvias, pero no así la temperatura.

Los solsticios y equinoccios *determinan astronómicamente lo más profundo de cada estación*[25], sin embargo, se ha convenido lo siguiente:

- *Primavera:* entre el equinoccio de primavera y el solsticio de verano.
- *Verano:* entre el solsticio de verano y el equinoccio de otoño.
- *Otoño:* entre el equinoccio de otoño y el solsticio de invierno.
- *Invierno:* entre el solsticio de invierno y el equinoccio de primavera.

Resulta interesante que el comienzo del nuevo año en el mundo occidental ocurre en la cercanía del solsticio de invierno del hemisferio norte, cosa que se repite con los comienzos de años de varios pueblos indígenas, por ejemplo, el comienzo del año Mapuche y Aymara ocurre el día del solsticio de invierno del hemisferio Sur.

Es importante considerar que *las estaciones se producen porque el plano de la eclíptica no coincide con el plano ecuatorial*, ellos forman un ángulo de 23° 26'. Esto produce una variación cíclica de la declinación del Sol. Analicemos como esto produce cambios en el clima:

Comencemos con el día del solsticio de invierno. Este día el Sol alcanza la mínima altura máxima del año, luego, con el transcurso de los días, progresivamente aumenta su altura máxima en el cielo, lo que trae como consecuencia un aumento del tiempo que el Sol se encuentra sobre el horizonte y una disminución de la duración de la

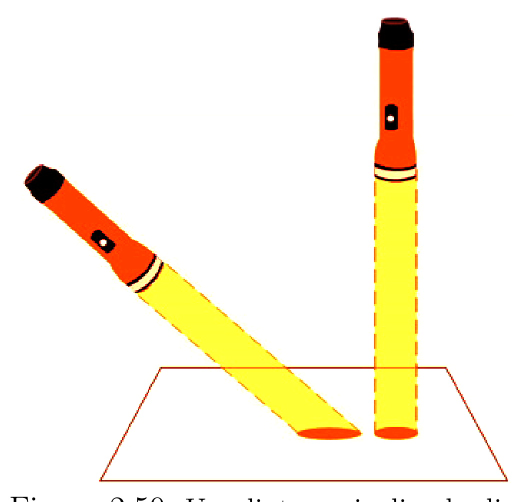


Figura 2.50: Una linterna inclinada distribuye su energía en un área mayor que una que ilumina verticalmente. De la misma forma, la variación de la altura del Sol distribuirá la energía en un área mayor o menor dependiendo de la hora y de la altura máxima alcanzada.

[25] Esto significa que en realidad las estaciones comienzan cerca de seis semanas antes de lo convenido.

noche. Cuando el Sol pasa el ecuador, el día y la noche duran lo mismo en ambos hemisferios, es el equinoccio de primavera. El Sol continúa aumentando su altura máxima progresivamente hasta el solsticio de verano. Los rayos solares inciden cada vez más perpendicularmente, la consecuencia de este proceso es un calentamiento del hemisferio.

Luego del solsticio de verano, el Sol comienza progresivamente a disminuir su altura máxima en el cielo, produciendo una disminución del tiempo que el Sol se encuentra sobre el horizonte y un aumento de la duración de la noche. Cuando el Sol pasa el ecuador, el día y la noche duran lo mismo en ambos hemisferios, es el equinoccio de otoño. El Sol continua disminuyendo su altura máxima progresivamente hasta el día del solsticio de invierno. Los rayos solares inciden cada vez más oblicuamente, la consecuencia de este proceso es un progresivo enfriamiento del hemisferio.

Es importante observar que mientras la altitud máxima del Sol disminuye en un hemisferio, aumenta en el otro.

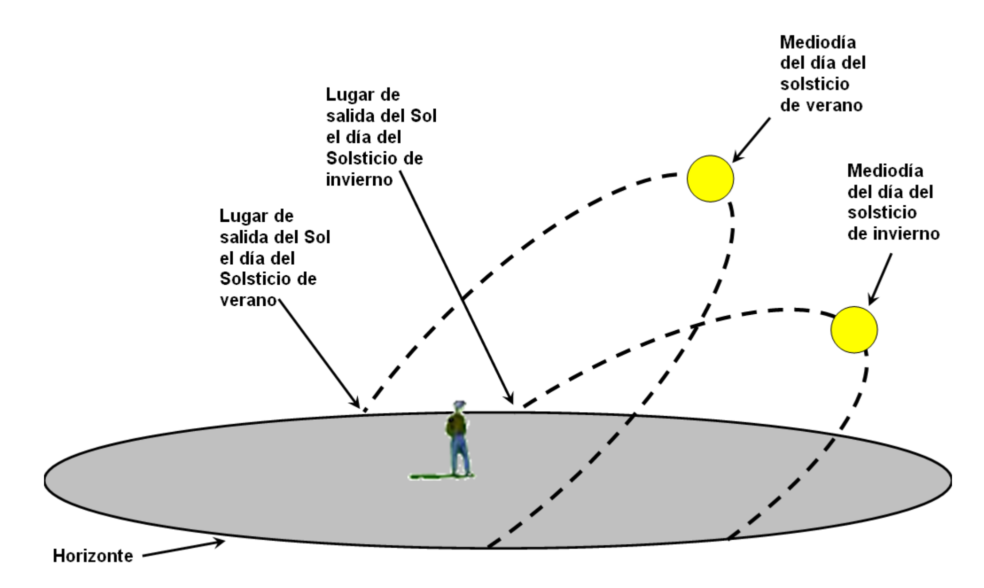


Figura 2.51: Variación de la altura máxima solar durante el año. La línea segmentada representa el movimiento diario del Sol y no la eclíptica. Observe que la longitud del arco que recorre el Sol es menor para declinaciones máximas menores.

Si el plano ecuatorial no estuviese inclinado respecto al plano de la eclíptica, el Sol se hallaría todo el año sobre el ecuador, y todos los días del año llegaría a la misma altura máxima sobre el horizonte, por lo cual el tiempo que el Sol se encontraría sobre el horizonte sería siempre el mismo en una misma latitud.

Existen otros factores que inciden en qué tan marcadas son las estaciones, por ejemplo, la distribución de continentes trae como consecuencia que en el hemisferio Sur tenga mayor proporción de hidrósfera que en el Norte, acumulando mayor energía durante el verano y que cede a la atmósfera durante el invierno. Esto contibuye a que en el hemisferio Sur los inviernos sean menos crudos y los veranos menos calurosos.

Desde un punto de vista heliocéntrico, la inclinación del plano ecuatorial respecto del eclíptico equivale a la inclinación del eje de rotación terrestre respecto del plano de la eclíptica. Este eje, durante el año apunta siempre en la misma dirección; los polos celestes (figura 2.52).

Observe que *la sucesión de las estaciones no se debe a que el movimiento orbital de la Tierra es elíptico* (1ª Ley de Kepler), pues la incidencia de la variación de distancia

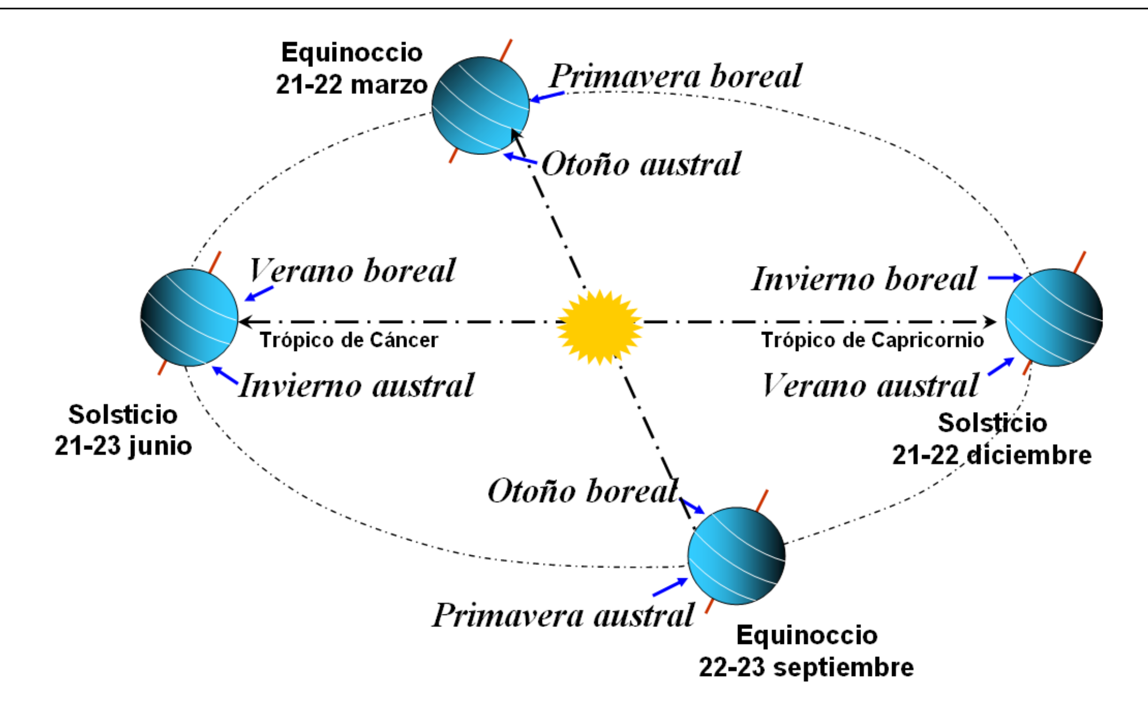


Figura 2.52: Visión heliocéntrica de las estaciones del Año.

Tierra-Sol en su movimiento orbital es despreciable. Por lo que en el caso de planetas con órbitas muy excéntricas, la inclinación del eje rotacional respecto de su plano de órbita, determina si dicho planeta experimenta o no estaciones.

La línea de los solsticios y la de los equinoccios permiten dividir la órbita elíptica en 4 zonas, correspondientes cada una a las estaciones, pero como estudiaremos más adelante, la velocidad orbital de la Tierra no constante. Se mueve más rápido en las cercanías del perihelio y más lentamente en las cercanías del afelio (2ª Ley de Kepler) y por ello, los hemisferios boreal y austral son desigualmente iluminados por el Sol en el transcurso del movimiento orbital de la Tierra. El hemisferio boreal tiene una mayor duración de la insolación en primavera y verano, aunque dicho fenómeno se compensa parcialmente por el hecho de que la Tierra alcanza su perihelio el 3 o 4 enero, cuando en el hemisferio Sur es verano.

Así las zonas en la que dividimos la elipse poseen áreas distintas, las áreas más grandes corresponderán a mayor duración de esas estaciones. De esta forma tenemos:

- Primavera Boreal y Otoño Austral: 92 días, 20 horas.
- Verano Boreal e Invierno Austral: 93 días, 15 horas.
- Otoño Boreal y Primavera Austral: 89 días, 19 horas.
- Invierno Boreal y Verano Austral: 89 días.

Aunque desde el punto de vista astronómico los equinoccios y solsticios marcan lo más profundo de las estaciones, la inercia térmica de la atmósfera terrestre y sus océanos hace que las estaciones esten desfasadas ligeramente con respecto a los períodos de mayor y menor insolación solar, y debido a ello los equinoccios y solsticios marcan en la práctica, el inicio (y término) de las estaciones.

Además, el movimiento de precesión produce cambios de las zonas de la elipse en que ocurren las estaciones, de forma que, en aproximadamente en unos 13.000 años, la Tierra estará más cercana al Sol durante los veranos del hemisferio Norte. Esto causa cambios globales del clima.

2.14. Bibliografía del Capítulo

- *Cosmos, la serie de TV*. Carl Sagan Productions, Inc. 1980.
  - Capítulo 1: En la orilla del océano cósmico.
- *Astronomía Fundamental*. Vicent Martínez, Joan Miralles, Enric Marco y David Galadí-Enríquez. Editorial PUV. 2008.
  - Capítulo 2: Astronomía Esférica.
  - Capítulo 4: El Sistema Solar.
- "*El origen de las constelaciones griegas*". Bradley Schaefer. Investigación y Ciencia, Enero 2007 pág. 73.
- *Mitología del firmamento*. Eratóstenes. Aliansa Editorial. 1999.
- *Constelaciones y Mitos*. David Ovelleiro. http://maravillososgatos.iespana.es/maravillososgatos/documentos/constelaciones.pdf
- *Eclipses*. Juan Carlos Casado y Miquel Serra-Ricart. Instituto de Astrofísica de Canarias. http://www.iac.es/educa/eclipses/unidad.pdf
- Swinburne Astronomy Online: http://astronomy.swin.edu.au/sao/
  - Patrones Estelares.
  - Día y Noche.
  - Las Estaciones de la Tierra.
- Posidonio de Apamea: http://www.sofiaoriginals.com/sept58posidonio.htm
- James Cook y el Tránsito de Venus: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2004/28may_cook.htm

Capítulo 3

Elementos de Mecánica Celeste



Objetivos

Objetivos Generales

- Identificar diferentes tipos de cuerpos que componen el Sistema Solar, la Vía Láctea y el Universo.

Objetivos Específicos

- Conocer y comprender las leyes que rigen el movimiento de planetas, satélites y estrellas.
- Conocer y comprender la ley de Gravitación Universal.
- Comprender las razones de las mareas en cuerpos celestes.

Contenidos

- Introducción.
- Leyes del Movimiento Planetario.
- Fuerzas de Mareas.

Introducción

La *mecánica celeste* es la rama de la astronomía que tiene por objeto el estudio de los movimientos de los cuerpos celestes haciendo uso de la rama de la física conocida como mecánica, generalmente la newtoniana. Estudia el movimiento de los planetas alrededor del Sol y de sus satélites. Su conocimiento permite el cálculo de las órbitas de cometas y asteroides.

En el siglo XIX fue observado un extraño movimiento de Urano en torno de su órbita. Haciendo uso de la mecánica celeste, *Urbain Le Verrier*, comprendió que estas anomalías se debían a perturbaciones causadas por un planeta hasta entonces desconocido. Es así como a través de cálculos se descubrió el planeta Neptuno.

El mismo Le Verrier descubrió un pequeño avance del perihelio de Mercurio, que no fue posible de explicar a través de la teoría de la gravitación de Newton. Este fenómeno quedó sin explicación hasta que Einstein construye una nueva teoría de la gravedad, la teoría de la Relatividad General.

3.1. Leyes del Movimiento Planetario

Los modelos generados por lo antiguos griegos (ver Apéndice C) permitieron explicar, sin mayores complicaciones, en gran parte los movimientos observados de los cuerpos celestes. Los modelos de Aristóteles y Ptolomeo son los dominantes durante siglos y la doctrina cristiana (y su iglesia) borró los vestigios del conocimiento antiguo que sobrevivió a la destrucción de la biblioteca de Alejandría. Afortunadamente el mundo musulmán permitió la supervivencia de parte del conocimiento antiguo, y gracias principalmente al comercio, la reconquista de la peninsula ibérica por los reinos cristianos peninsulares y la época de las exploraciones, reingresa a occidente.

Ptolomeo, quien fue director de la biblioteca de Alejandría en el siglo II, sistematizó el conocimiento antiguo de la astronomía; registró nombre de estrellas, catalogó su brillo, dio buenas razones para concluir que la Tierra es una esfera, estableció normas para predecir eclipses, y legó un modelo geocéntrico que explicaba el movimiento retrógrado de los planetas respecto de las estrellas de fondo.

Hacia fines de la Edad Media, en las universidades europeas, principalmente italianas, se cuestionaba el modelo de Ptolomeo ya que contradecía la física de Aristóteles: no describía el movimiento planetario con movimientos circulares "puros", sino a través de epiciclos (ver Apéndice C).

Es así como *Nicolás Copérnico* (1473 - 1543) clérigo católico y astrónomo[1] polaco, se dio cuenta que un modelo heliocéntrico permitiría a través de movimientos circulares simples entorno del Sol junto a un triple movimiento de la Tierra[2], explicar la retrogradación de los planetas. Poco antes de morir envió a publicar "*De Revolutionibus Orbium Celestium*" donde revive el modelo heliocéntrico de Aristarco, aunque va más allá que Aristaco, pues lo desarrolla al punto de permitir hacer cálculos predictivos de la posición de astros, efemerides, etc., a tal punto que permitirá años más tarde, tal como lo sugiere Copernico en el prefacio dedicado al papa Pablo III, la reforma del calendario. Aunque Copernico era un convencido que su modelo tenía ralidad física, sus contemporaneos lo consideraron,

[1] En realidad fue también matemático, jurista, gobernador, astrólogo, diplomático y economista.

[2] Note que en el modelo heliocéntrico la Tierra asume la condición de planeta.

tal como indicaba el prólogo anónimo del *Revolutionibus* (escrito por el teólogo luterano Andreas Osiander), solo un modelo matemático que permitía hacer mejores cálculos que el sistema geocéntrico ptolemaico, y fue considerado, excepto contadas excepciones, de esta manera por casi 60 años.

Aunque matemáticamente el modelo copernicano era superior al geocéntrico ptolemaico, no daba cuenta completamente de los movimientos observados, por lo que tuvo igualmente que recurrir a la idea de movimientos excéntricos o equivalentemente epiciclicos, no cumpliendo completamente su objetivo platónico de encontrar movimientos circulares que expliquen los movimientos observados de los astros. Además, los mismos cuestionamientos que no le dieron credibilidad al modelo de Aristarco eran aplicables al modelo de Copérnico, más aún, como ya indicamos, este último incluía epiciclos. Por ejemplo, si la Tierra se moviera como un planeta en torno del Sol, sería apreciable paralaje para las estrellas, y dado que esto nunca había sido observado, los eruditos de la época suponen el modelo heliocéntrico como un mero artilugio geométrico. Desde el punto de vista filosófico y religioso no resulta un mero detalle quitar a la Tierra del centro del Universo.

Aunque en un principio la obra de Copérnico no significó ninguna incompatibilidad con el credo católico (sí lo hizo con el protestantismo), la presión del protentantismo al respecto y la insistencia de algunos como Giordano Bruno (1548 - 1600) y posteriormente Galileo que el modelo tenía realidad física, llevó a que en 1616 la Iglesia católica ingresara el libro de Copérnico en su lista de libros prohibidos hasta su corrección por censores eclesiásticos. Permaneció en esta condición hasta 1835.

En 1589 ingresa a la Universidad de Tübingen (Tubinga) el alemán *Johannes Kepler* (1571 - 1630) con la intención de convertirse ministro luterano. Allí estudió matemáticas, física y astronomía, y conoció la hipótesis de Copérnico gracias a que su maestro Michael Maestli (1550 - 1631) la enseñaba en privado a los alumnos aventajados.

Siendo un Pitagórico, Kepler estuvo obsesionado por la idea que la existencia de sólo seis planetas, se debía a que había sólo cinco sólidos regulares o pitagóricos, cuyos lados son polígonos regulares, y que esos sólidos, inscritos o anidados uno dentro de otro, determinarían las distancias del Sol a los planetas. Afortunadamente su hipótesis no coincidía con las observaciones, lo cual lo llevó a buscar mejores observaciones, observaciones que solo tenía el astrónomo danés *Tycho Brahe* (1546 - 1601), quien durante 35 años realizó los registros más acuciosos realizados hasta ese momento de la posición de diferentes cuerpos celestes.

Exiliado por motivos religiosos, y aceptando una invitación de Tycho, Kepler viaja a Praga donde Tycho se desempeñaba como matemático imperial. Tycho, por razones que desconocemos, no dio los datos astronómicos que tanto ansiaba Kepler, sin embargo, el paciente Kepler esperó. 18 meses más tarde, en 1601 Tycho, legó sus observaciones a Kepler en su lecho de muerte diciéndole: "Non frustra vixisse vidcor" ("Que no haya vivido en vano").

3.1.1. Leyes de Kepler

Kepler, convertido en el nuevo matemático imperial, se dedicó a construír su sistema del mundo, solo que las observaciones de Tycho confirmaban más el sistema de Copérnico que el suyo. En particular las observaciones del movimiento de Marte, no permitieron a Kepler adaptar una órbita circular y luego de algunos años de trabajo logró ajustar los datos a una elipse. Fueron 8 minutos de arco de un par de datos de Tycho que permitieron

a Kepler desechar las órbitas circulares incuestionables durante siglos. Eso muestra la gran confianza que tenía Kepler de la precisión de los datos de Tycho.

De esta forma, la primera ley cinemática[3] del movimiento planetario, conocida también como *ley de las órbitas*, puede ser enunciada como:

Ley 1 *Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas en torno al Sol, el cual ocupa uno de sus focos.*

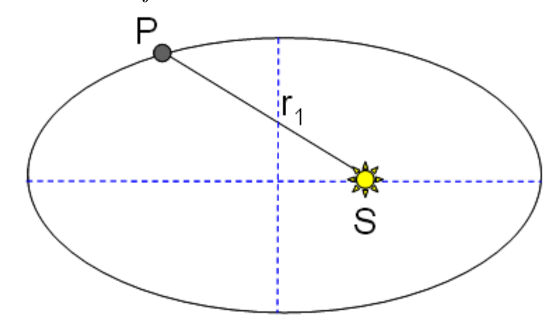


Figura 3.1: *Primera ley de Kepler:* Las órbitas planetarias son elípticas y el Sol ocupa uno de los focos, r_1 se denomina radio vector.

Kepler además encontró la relación entre posición de un planeta y su velocidad de órbita, dando origen a la segunda ley del movimiento planetario. Cuando un planeta se encuentra en las cercanías del Sol, se mueve más rápido que cuando se encuentra más lejos. Kepler encontró una precisa relación matemática de este hecho.

Llamaremos *radio vector* al segmento imaginario que une al Sol con el planeta en cuestión. Así cuando un planeta se mueve a través de su órbita el radio vector cambia de longitud y de orientación, teniendo en consideración lo anterior, el enunciado de la segunda ley de Kepler, conocida también como *ley de las áreas*, es:

La elipse es el lugar geométrico de todos los puntos que mantienen constante la suma de las distancias a dos puntos fijos llamados focos.

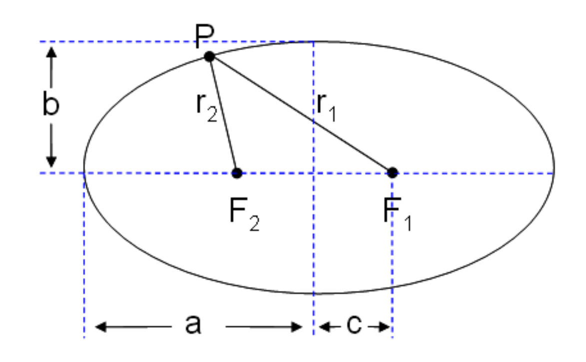


Figura 3.2: *Parámetros de la Elipse:* a : Semieje mayor; b : Semieje menor; c : Semidistancia focal; $\varepsilon = \frac{c}{a}$: excentricidad $(0 < \varepsilon < 1)$; además $r_1 + r_2 = cte.$

Si los focos coinciden, la figura que se obtiene es una circunferencia, podemos entonces decir que una elipse es una "circunferencia achatada". El parámetro que mide que tan achatada es, se denomina excentricidad (ε). Una circunferencia tiene una excentricidad nula y el caso opuesto correspondería a un segmento, que tiene excentricidad unitaria. La excentricidad de la órbita terrestre es $\varepsilon_T \simeq 0{,}017$, es decir, casi una circunferencia.

Ley 2 *El área barrida por el radio vector de un planeta es proporcional al tiempo empleado en barrerla, en otras palabras, barre áreas iguales de la elipse en tiempos iguales.*

Estas dos primeras leyes fueron publicadas en 1609 en la "*Astronomĭa Nova*". Luego de casi diez años de trabajo, Kepler publicó "*Harmonices Mundi*" donde dió a conocer su tercera ley del movimiento planetario, conocida también como ley de los períodos:

Ley 3 *El cuadrado del período de revolución*[4] *de un planeta* (T) *es proporcional al cubo*

[3]La cinemática es el estudio de los movimientos independientemente de las interacciones que los producen.

[4]El periodo de revolución es el tiempo que requiere un cuerpo celeste en recorrer su órbita.

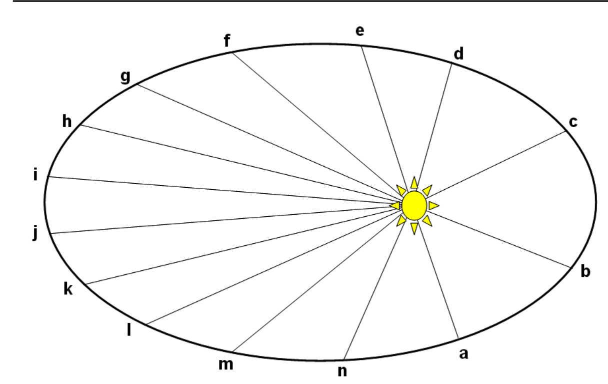


Figura 3.3: Según la segunda ley, un planeta se desplaza desde "a" hasta "b" en el mismo tiempo que desde "c" a "d" o entre cualquier par de letras consecutivas, si las áreas son iguales, esto implica que a medida que un planeta disminuye su distancia al Sol se mueve más rápido, por el contrario si se aleja entonces se mueve más lento. Este fenómeno es muy notorio en cometas con órbitas muy excéntricas.

del semieje mayor de la elipse que describe su órbita (a).

Matemáticamente:

$$T^2 \propto a^3$$
$$T^2 = k \cdot a^3$$

donde $\propto$ es el símbolo de proporcionalidad. Al convertir esta proporcionalidad en una igualdad introducimos una constante de proporcionalidad denotada por k. Empíricamente se ha evidenciado que si el período de revolución se mide en años terrestres y el semieje mayor de la elipse en unidades astronómicas (UA), la constante vale $k \simeq 1 \left[\frac{años^2}{UA^3}\right]$.

La tercera Ley, entrega una expresión matemática que relaciona períodos orbitales con distancias del planeta al Sol. El semieje mayor de la elipse de la órbita corresponde justamente a la distancia media del planeta al Sol, dado que el perihelio y el afelio se encuentran en el eje mayor tenemos:

$$\frac{r_{max} + r_{min}}{2} \equiv a$$

Además:

$$r_{min} = a\,(1 - \varepsilon) = perihelio$$
$$r_{max} = a\,(1 + \varepsilon) = afelio$$

Resulta inmediato poder obtener información del sistema solar usando esta ley, mostraremos su eficacia con dos ejemplos.

Ejemplo 1 *Como resultado de observaciones, se sabe que Saturno tiene un período órbital de 29.46 años terrestres. Usando la tercera Ley de Kepler, calcule la distancia media al Sol.*

Solución: *La tercera ley de Kepler afirma:*

$$T^2 = ka^3$$

Reemplazando los valores del problema:

$$(29{,}46)^2 = a^3$$

aplicamos la raiz cúbica para despejar "a" que corresponde a la distancia media al Sol:

$$a = (29{,}46)^{\frac{2}{3}} \approx 9{,}54 \ [UA]$$

Ejemplo 2 *Un planeta X se encuentra 4 veces más lejos del Sol que la Tierra. ¿Cuál es su período orbital?.*

Solución: *Ahora nuestra incognita es el período orbital del planeta (T), debemos entonces reemplazar en la ecuación, el valor dado de distancia media:*

$$T^2 = (4)^3$$

y para despejar nuestra incógnita debemos aplicar raiz cuadrada:

$$T = \sqrt{64} = 8 \text{ [años]}$$

3.1.2. Galileo, el Telescopio y la Inercia

El mismo año que Kepler publicó sus primeras dos leyes, un astrónomo toscano, *Galileo Galilei* (1564 - 1642), observa a través del primer telescopio. Galileo fue el primer ser humano que descubre[5] y observa a través de un telescopio. Así, mientras Kepler publicaba sus leyes del movimiento planetario, Galileo con su telescopio observaba cuatro "*planetas*" girando en torno a Júpiter. Ptolomeo y Aristóteles estaban equivocados, la Tierra no es el centro del mundo, el modelo heliocéntrico comenzó a tener pruebas, aunque un modelo heliocéntrico modificado, pues Kepler había derrumbado la idea que dominó desde Platón acerca de los movimientos circulares.

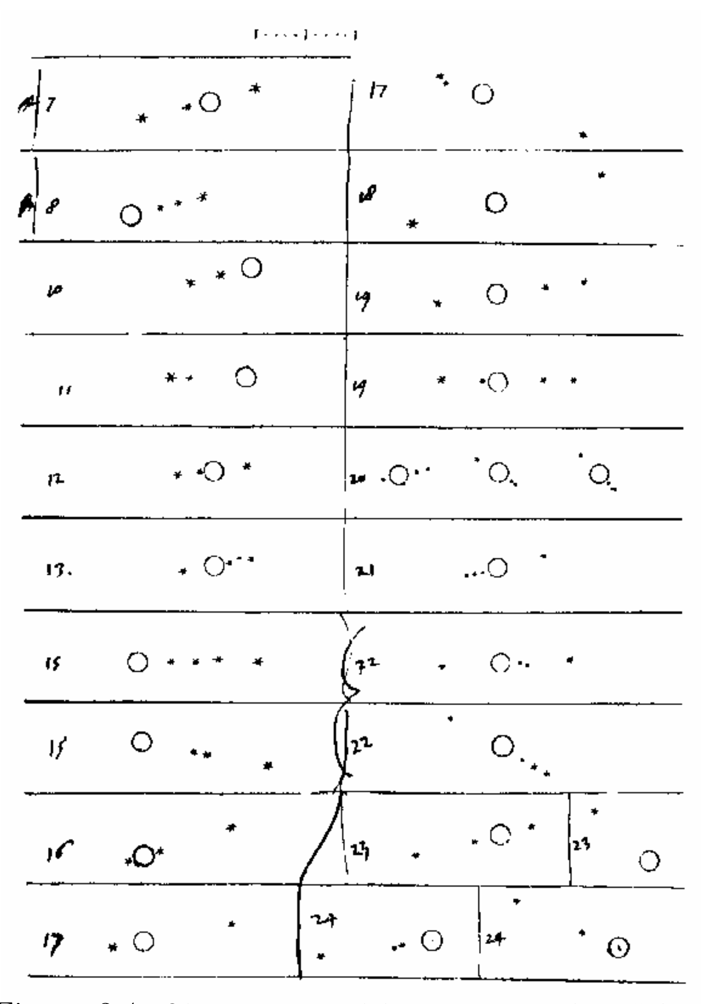


Figura 3.4: Observaciones del movimiento de 4 "planetas" en torno de Júpiter (círculo central), efectuadas por Galileo entre el 7 y el 24 de enero de 1610.

La nueva herramienta de Galileo, le permitió descifrar la composición estelar de la Vía Láctea, observar un par de extraños cuerpos en el ecuador de Saturno, y descubrir las manchas solares y gracias a ellas la rotación del Sol.

[5]Galileo, sin embargo, no es el inventor del instrumento óptico, mas, es el primero en usarlo con fines astronómicos.

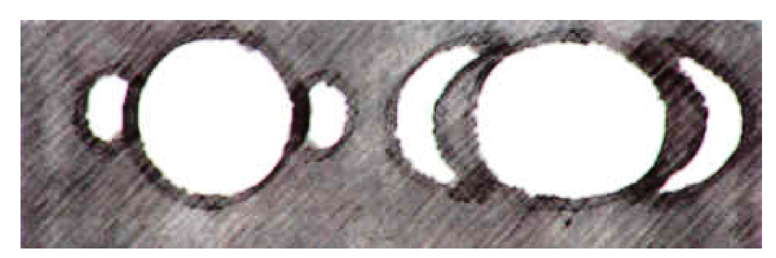


Figura 3.5: *Saturno visto por Galileo:* En agosto de 1610 Galileo envió a Kepler el siguiente anagrama: "SMAISMRMILMEPOETALEUMIBUNENUGTTAUIRAS", Kepler decodificó erroneamente el mensaje que contenía la siguiente información: "Altissimum planetam tergeminum observavi" (He observado el planeta más alto en triple forma).

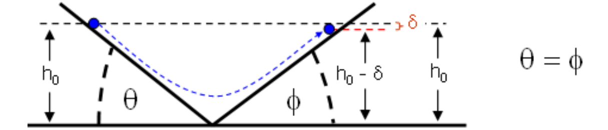
Galileo aceptó la hipótesis copernicana, sus observaciones mostraban evidencias irrefutables en contra del modelo geocéntrico, tales como las fases de Venus, la irregular superficie de la Luna, los satélites moviéndose entorno de Júpiter. En marzo de 1610 publicó en Venecia un tratado titulado *Sidereus Nuncius* (Mensajero sideral) donde daba cuenta de sus observaciones.

Convertido en un acérrimo defensor del heliocentrismo intentó demostrar que la Tierra rotaba. Se convenció que el flujo de las mareas se debía al efecto de la rotación terrestre, aceptando esto como prueba de ello. Como veremos en la sección 3.2 esta hipótesis resulta incorrecta. En su *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, ptolemaico e copernicano* (1632) intenta explicar, entre otras cosas, el por qué no se evidencia la rotación terrestre en objetos que no están en contacto con la superficie, por ejemplo, si una persona salta, según la argumentación aristotélica, mientras está en el aire la Tierra debería desplazarse, de forma que al caer, debería hacerlo en un lugar distinto del que saltó. Para demostrar la falsedad de esta argumentación, Galileo propone un experimento en el que se deja caer una bola desde una cierta altura por un plano inclinado. Si ubicamos otro plano inclinado inmediatamente a continuación de este plano, la bola puede subir por éste aunque alcanzando una altura menor (ver figura 3.6). Galileo indica que si se logra disminuir el roce de la bola con el plano inclinado, éste alcanzará mayor altura. En el caso que lográramos eliminar completamente el roce, la altura alcanzada sería igual a la altura de partida. Galileo explica que al variar el ángulo de inclinación del segundo plano, el cuerpo alcanza siempre la misma altura (caso sin roce). Si el segundo plano coincide con la horizontal, el cuerpo nunca podrá alcanzar la altura inicial, por lo cual se moverá indefinidamente con rapidez constante. Luego concluye que *en ausencia de resistencia horizontal todo cuerpo permanecerá en reposo o se moverá indefinidamente con velocidad uniforme.* Por lo que el movimiento es un estado natural de los cuerpos, lo cual contradice la física aristotélica[6].

Esta idea es la predecesora de lo que más tarde se denominará principio de inercia, que será enunciado más precisamente por René Descartes (1596 - 1650) y modificado años después por Sir Isaac Newton (1642 - 1727) incorporando el concepto de fuerza.

Llamamos *fuerza* a la interacción entre dos o más cuerpos. Las fuerzas son causantes del cambio de movimiento, la deformación y/o ruptura de los cuerpos. Las fuerzas además de su magnitud necesitan que informemos en que dirección se aplican, en el lenguaje técnico se dice que son magnitudes vectoriales. Dado que las magnitudes vectoriales tienen información adicional de dirección, se denotan distinto. Analicemos esto con un ejemplo. Suponga que un cuerpo, digamos A, ejerce una fuerza de algún tipo sobre otro cuerpo B, entonces denotamos esta fuerza como $\overrightarrow{F}_{A\to B}$. En física la notación es de vital importancia,

[6]La idea aristotélica es que el estado natural de los cuerpos es el reposo, idea por lo demás completamente intuitiva.



El valor δ depende del roce. Si no existe roce δ = 0.

Caso sin roce (δ = 0), disminuyendo uno de los ángulos:

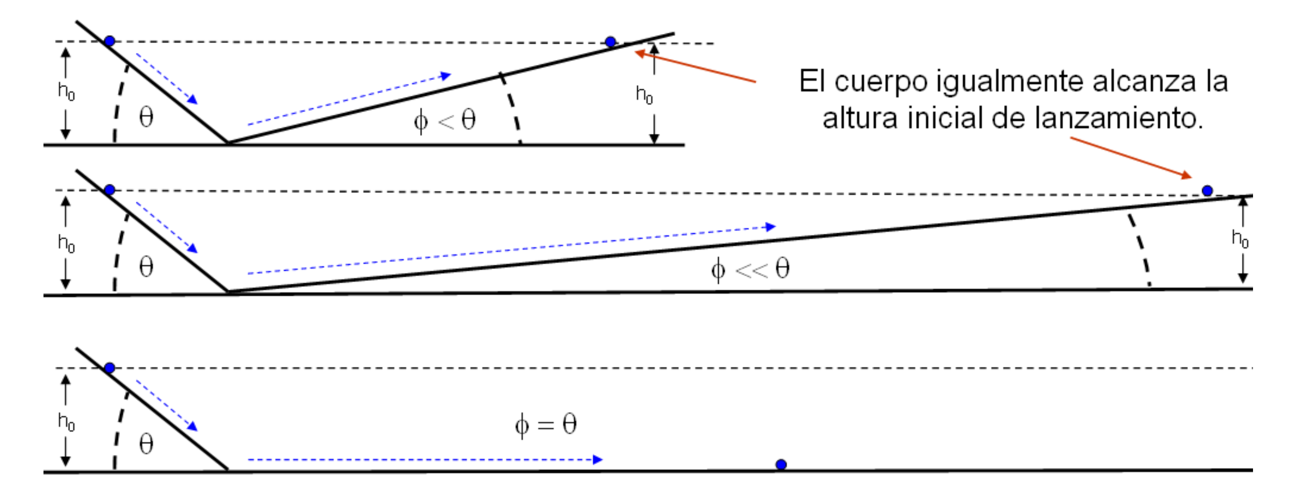


Figura 3.6: Experimento de los planos inclinados de Galileo. El roce evita que la bola alcance la altura inicial de lanzamiento. Si este pudiera ser eliminado, y si se disminuye uno de los ángulos hasta cero, la bola nunca podría alcanzar la altura inicial de lanzamiento, entonces, se mueve perpetuamente en línea recta con rapidez constante.

en nuestro caso no utilizaremos vectores.

Es importante hacer notar que las fuerzas actúan o se ejercen sobre un cuerpo, mas los cuerpos no tienen ni poseen fuerzas, pues ellas no son una propiedad de éstos.

Así enunció Newton este importante principio en 1687 en su libro "*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*" (Principios Matemáticos de la Filosofía Natural):

Lex 1 *Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.*

Una traducción al castellano puede ser:

Ley 4 (Principio de Inercia) *Todo Cuerpo persiste en su estado de reposo, o de movimiento uniforme y rectilíneo, a menos que se vea obligado por fuerzas externas a cambiar su estado.*

El principio de inercia afirma que el estado natural de movimiento de los cuerpos es la velocidad constante, donde el reposo es un caso especial, en el cual la velocidad posee valor nulo ($\overrightarrow{v} = 0$).

3.1.3. Newton y la Gravitación

Gracias al conocimiento de la cinemática planetaria dado por las leyes de Kepler, Isaac Newton interpretó que el movimiento de los satélites alrededor de Júpiter, debía

estar regido por la misma ley natural que el movimiento de los planetas alrededor del Sol, y de la misma forma la Tierra debe mantener a la Luna en su órbita.

Newton supuso que en todos estos casos había una interacción o fuerza entre el cuerpo central y los cuerpos celestes que están describiendo las órbitas. Si no fuese así, los planetas se moverían en trayectorias rectilíneas. Newton tuvo la genialidad de comprender que esta fuerza debe ser la misma fuerza que gobierna el movimiento de un objeto que cae sobre la superficie de la Tierra.

La descripción de esta relación es una ley universal que unifica la mecánica celeste con la terrestre. El salto conceptual de Newton, se puede expresar de la siguiente manera:

Ley 5 (de la Gravitación Universal) *Dos objetos cualquiera por el solo hecho de poseer masa ejercen fuerzas cada uno sobre el otro, denominadas gravitacionales, cuyas magnitudes son proporcionales al producto de las masas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que los separa.*

Matemáticamente:

$$F_{1\to 2} \propto \frac{m_1 m_2}{d^2}$$
$$F_{1\to 2} = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

donde $\propto$ es el símbolo de proporcionalidad. Al convertir esta proporcionalidad en una igualdad introducimos una constante de proporcionalidad denotada por G y denominada constante de gravitación universal. En el sistema internacional de medidas tiene un valor de $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \left[\frac{m^3}{kg\ s^2}\right]$.

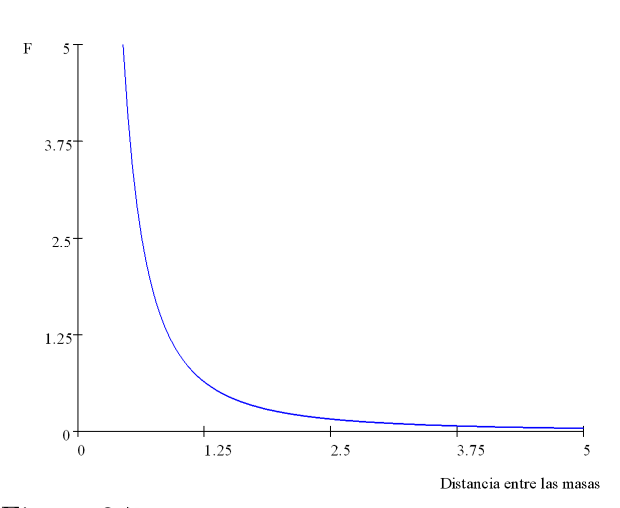


Figura 3.7: Gráfico de la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos con masas fijas v/s la distancia de separación de los cuerpos.

Usando la ley de gravitación y el principio de inercia, Newton fue capaz de explicar la causa por el cual los cuerpos celestes siguen trayectorias curvas.

Un cuerpo que se mueve bajo la acción de la fuerza gravitacional no puede seguir en línea recta, movimiento que tendría de no existir fuerza alguna. Podemos suponer que para que el cuerpo siga una línea curva, realiza desplazamientos ínfimos llamados *infini-*

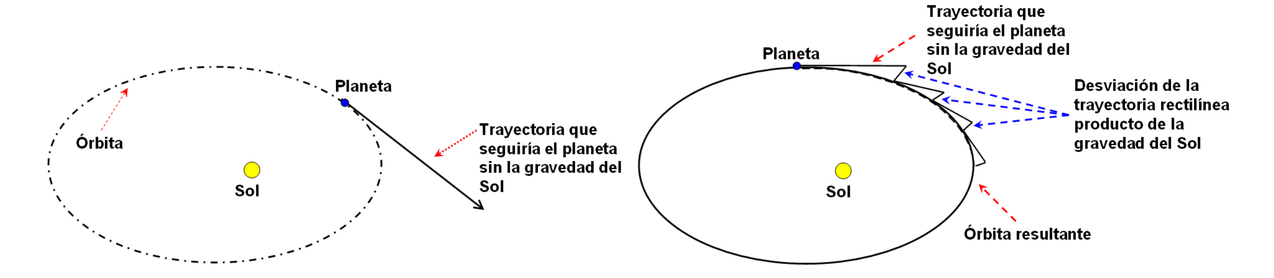


Figura 3.8: (Izquierda) Dos trayectorias, la recta es la que seguiría un cuerpo que no está sometido a fuerza alguna y la curva que sigue un planeta debido a la gravedad del Sol.

Figura 3.9: (Derecha) Pequeños desplazamientos infinitesimales de la linea recta producidos por la gravedad da como resultante la curva observada en la figura de la izquierda.

tesimales[7] producidos por la gravedad, en dirección del Sol, de forma que la trayectoria resultante es una curva.

Usando esta idea Newton explica en el libro "*De mundi systemate liber*"[8] el hecho que la Luna orbite en torno a la Tierra:

"*Si consideramos los movimientos de los proyectiles se comprende que los planetas puedan ser retenidos en órbitas ciertas mediante fuerzas centrípetas*[9]*; pues una piedra proyectada se va apartando de su senda rectilínea por la presión de su propio peso y obligada a describir en el aire una curva, cuando en virtud de la sola proyección inicial habría debido continuar dicha senda recta, en vez de ser finalmente atraída al suelo; y cuanto mayor es la velocidad con la cual resulta ser proyectada más lejos llega, antes de caer a tierra. Podemos por eso suponer que la velocidad se incremente hasta que la piedra describa un arco de una, dos, cinco, cien, mil millas antes de caer, de forma que al final, superando los límites de la Tierra, pasará al espacio sin tocarla...*"[10]

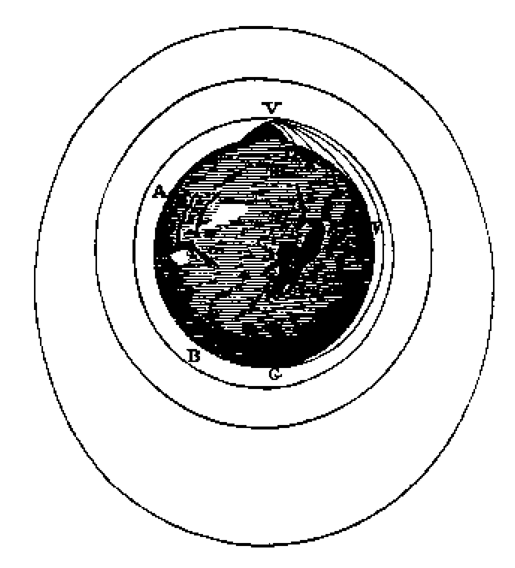


Figura 3.10: En la figura se representa las curvas que un cuerpo describiría si fuese proyectado en dirección horizontal desde la cima de una alta montaña a más y más velocidad. Puesto que los movimientos celestes no poseen roce u otro efecto disipativo, supongamos, para conservar la analogía, que en la Tierra no hubiera aire, o que el efecto de éste sea tan pequeño que puede ser despreciado.

Entonces, por la misma razón es que un cuerpo lanzado con menos velocidad describe un arco menor y, lanzado con más velocidad, un arco mayor. Al aumentar la velocidad terminará por llegar más y más lejos sobre la superficie de la Tierra. Al superar cierto valor crítico de velocidad terminará retornando a la montaña desde la que fue lanzado.

Y si aplicamos la segunda Ley de Kepler, las áreas descritas por el movimiento del radio trazado desde el centro de la Tierra son proporcionales a su tiempo de descripción, así la velocidad al retornar a la montaña no será menor que al principio, por lo que describirá la misma curva una y otra vez.

3.2. Las Fuerzas de Mareas

Hasta el momento cuando hemos hablado de la fuerza de gravedad, hemos supuesto que los cuerpos son partículas materiales sin volumen, esto es una muy buena aproximación cuando los cuerpos se encuentran a grandes distancias respecto de sus tamaños. Cuando estudiamos los efectos de la gravedad de dos cuerpos no puntuales, como el caso del sistema Tierra-Luna, aparecen ciertos efectos interesantes que analizaremos a continuación.

[7] Se denominan infinitesimales debido a que son desplazamientos infinitamente pequeños.

[8] Este libro es un tratado que Newton suprimió de los "Principia" en su lugar publicó el libro tercero del mismo nombre "*De mundi systemate*". Esta desechada versión de su libro tercero fue publicada por primera vez en Londres en 1728, luego de la muerte de Newton.

[9] Centrípeta, nombre dado a las fuerzas que están dirigidas a un centro de rotación.

[10] Este texto en castellano ha sido tomado del artículo *Fuerza y Movimiento* de Miguel Hernández González publicado en la Revista Española de Física, Vol 10, n° 2, 1996, página 50.

En el siglo I a. de C. *Posidonio de Apamea* había observado la relación entre las mareas y la posición de la Luna y el Sol en la bóveda celeste, así no es extraño que al referirnos a las mareas, sólo pensamos en los océanos de la Tierra, pero los efectos gravitatorios son universales, así las mareas pueden ocurrir en otros lugares. Por ejemplo, la Luna experimenta fuerzas de mareas al igual que los satélites de otros planetas como los galileanos[11] de Júpiter. Incluso los efectos de marea resultan ser cruciales en las regiones que rodean a los agujeros negros.

Estudiaremos los efectos de marea en el sistema Tierra-Luna, pero éstos son completamente generales. Comenzaremos primero con las fuerzas de marea en la Luna, pues es un ejemplo más sencillo de explicar.

Supongamos inicialmente que la Luna es aproximadamante una esfera. La fuerza de gravedad que ejerce la Tierra sobre la Luna no es homogénea. Es de mayor intensidad en la cara más próxima a la Tierra y de menor intensidad en el lado más alejado de ella.

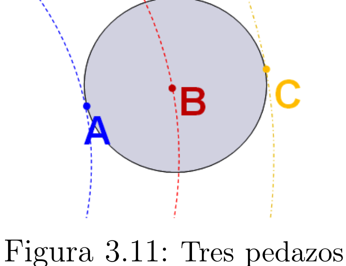


Figura 3.11: Tres pedazos de la Luna: "A", un pedazo del lado más cercano a la Tierra; "B", un pedazo del centro de la Luna; y "C", un pedazo del lado más alejado a la Tierra.

Consideremos el movimiento de tres pedazos de la Luna: "A" es un pedazo del lado más cercano a la Tierra, "B" es un pedazo en el centro de la Luna y "C" un pedazo del lado más lejano a la Tierra. Debido a que la rotación de la Luna alrededor de su propio eje es lenta en comparación con su movimiento en torno de la Tierra, podemos incialmente no considerarla.

Si A, B y C no estuvieran dentro de un cuerpo sólido, podrían moverse independientemente bajo la gravedad terrestre (despreciando los efectos gravitatorios entre ellos) siguiendo las trayectorias mostradas en la figura 3.11. De acuerdo a la tercera ley de Kepler: "A" viajaría más rápido que "B", y "C" viajaría más lentamente que "B", pero como "A", "B" y "C" están dentro de un cuerpo sólido, deben viajar alrededor de la Tierra a la misma velocidad orbital. Así "B" viaja a la velocidad adecuada a su órbita, pero puesto que "A" se encuentra más cercano a la Tierra, está viajando más lentamente que si tuviese una órbita independiente, y por lo mismo, ya que "C" se encuentra más alejado de la Tierra, viaja más rápido que lo que lo haría para una órbita independiente.

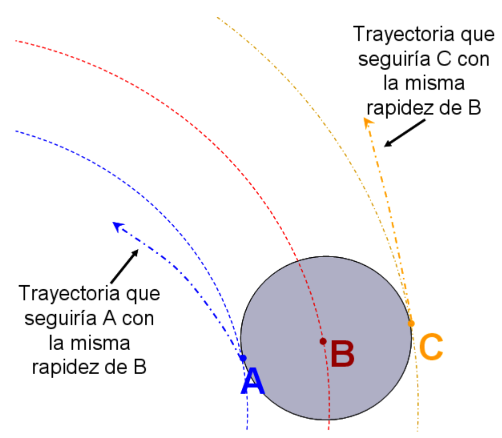


Figura 3.12: Si los tres pedazos fueran independientes y se movieran con la rapidez de B, solo B se mantendría en órbita, mientras A y C seguirían las trayectorias mostradas.

Si A, B y C no se hallaran unidos a la Luna, y se moviesen con la misma rapidez, "A" se movería hacia la Tierra pues no viajaría lo suficientemente rápido como para mantener esa órbita y "C" se movería alejándose de la Tierra pues viajaría demasiado rápido como para mantener esa órbita. Dado que tanto "A" como "C" están unidos a la Luna y no se pueden liberar de ella, compensan este fenómeno levantándose ligeramente sobre la superficie lunar, produciendo un abultamiento o deformación en ambos lados de la Luna.

[11] Llamados así en honor de su descubridor, Galileo Galilei.

De esta forma, la diferencia de la fuerza de gravedad entre los lados más próximo y alejado de los objetos que orbitan, tienden a distorsionarlos, pudiendo incluso fragmentar objetos débilmente unidos o bajo intensas fuerzas de gravedad. La distancia mínima a la que puede estar un planeta o satélite del otro cuerpo al que orbita, sin ser fragmentado es denominado *límite de Roche*.

Las fuerzas de marea que actúan sobre la Tierra, distorsionan la superficie sólida provocando levantamientos de ella de hasta 20 [cm], esto es, cerca de 1/20 del tamaño de la levantamiento de la superficie de la Luna debido a la fuerza de marea ejercida por la Tierra. Esto es imperceptible, sin embargo, resulta muy notorio en la hidrósfera terrestre.

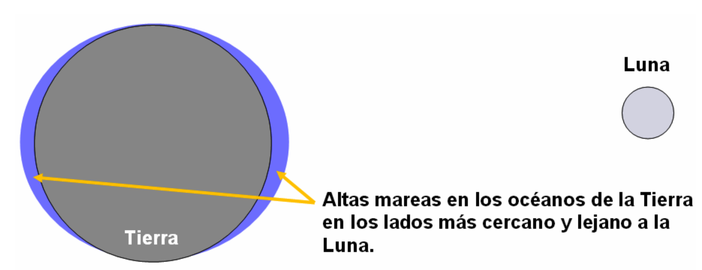


Figura 3.13: Deformación de la hidrósfera producto de la fuerza de marea.

Lo anterior explica por qué las mareas ocurren cada 12 horas y no cada 24, es decir, también ocurre la pleamar cuando la Luna se encuentra justo al otro lado de la Tierra. Esto puede ser explicado de una manera alternativa: como la hidrósfera se haya sobre la corteza terrestre, esta siente una fuerza más intensa produciendo un desplazamiento hacia la Luna (ver figura 3.14), pero la Tierra se desplaza respecto de la parte de la hidrósfera que se encuentra en el lado opuesto de la Luna, la combinación de ambos efectos produce que la hidrósfera se levante tanto en la cara que da a la Luna como aquella que se encuentra en el lado opuesto.

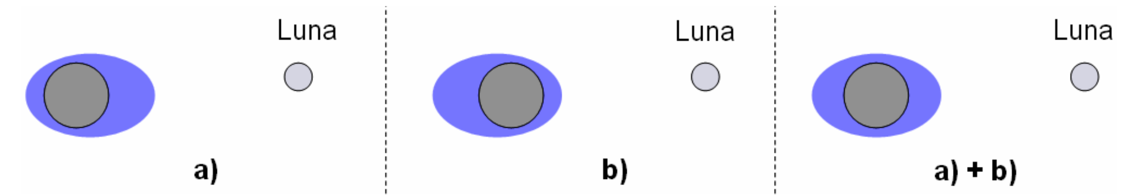


Figura 3.14: En la figura a) la hidrósfera se desplazada hacia la Luna, mientras que en la figura b) la Tierra se desplaza hacia la Luna, la figura más a la derecha muestra como la combinación de ambos efectos [a) y b)] produce dos alta mareas diarias.

El Sol también genera efectos de marea sobre la Tierra, pero dado que la Tierra y la Luna se hallan relativamente cercanas, la diferencia entre la fuerza gravitacional en un lado de la Tierra comparada con el otro es más apreciable (ver figuras 3.15 y 3.16). La Tierra y el Sol se hallan relativamente distantes, de modo que a pesar de que el Sol ejerce mayor fuerza gravitacional sobre la Tierra que la Luna, la diferencia entre la fuerza gravitacional en un lado de la Tierra comparado con el otro no es tan grande como el producido por la Luna. Por ello, los efectos de marea del Sol no son tan grandes. A pesar de ello, podemos apreciar sus efectos cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean, pues ocurren las mayores mareas oceánicas. Por el contrario cuando el Sol, la Tierra y la Luna están formando un ángulo recto, las mareas oceánicas son las menos intensas.

3.2.1. Rotación Sincrónica

Se dice que un cuerpo celeste tiene rotación sincrónica si tarda el mismo tiempo en girar sobre su propio eje que al girar alrededor del cuerpo central; por lo que mantiene

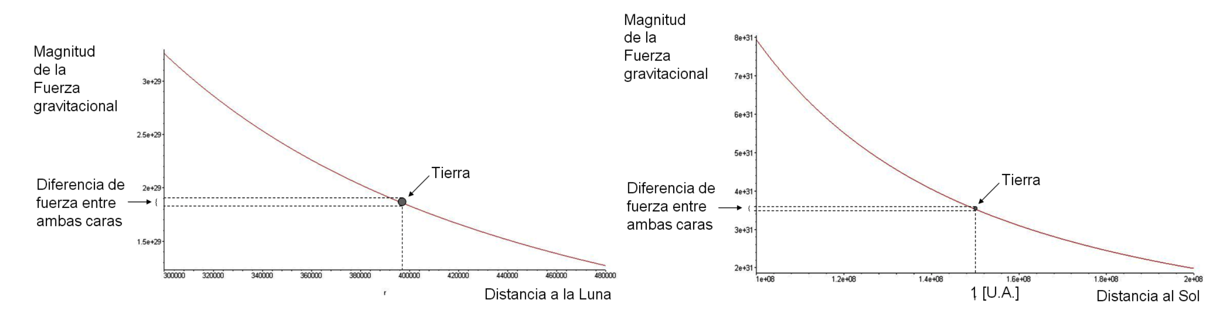


Figura 3.15: (Izquierda) Diferencia en la fuerza gravitacional que ejerce la Luna en un lado de la Tierra comparada con el otro.

Figura 3.16: (Derecha) Diferencia en la fuerza gravitacional que ejerce el Sol en un lado de la Tierra comparado con el otro.

siempre el mismo hemisferio apuntando al cuerpo al que orbita. Este fenómeno ha sido observado en casi todos los satélites naturales del sistema solar.

La Luna se encuentra casi en rotación sincrónica, por lo que prácticamente mantiene la misma cara dirigida hacia la Tierra, por lo que, la deformación de marea de la Luna permanece casi fija en su superficie.

Otro ejemplo de rotación sincrónica son el doble planeta enano Plutón y Caronte, ambos se hallan en rotación sincrónica, por lo que, se muestran siempre el mismo hemisferio.

Las teorías más aceptadas de la formación lunar sugieren que ésta originalmente rotaba a mucha mayor velocidad. Por lo que, a medida que la Luna rotaba, la deformación habría estado continuamente moviéndose a través de su superficie; elevándola y bajándola. Este verdadero montículo que se mueve a través de la superficie, habría quitado energía a la rotación lunar, produciendo una disminución de su velocidad de rotación. Este fenómeno solo se detendrá cuando dicho montículo se quede fijo en la superficie lunar.

Si Plutón y Caronte se encuentran en rotación sincrónica, y si la Luna también lo está ¿por qué la Tierra no se encuentra en esta condición?.

Los registros geológicos muestran que cuando la Tierra recién se había formado las mareas oceánicas sucedían a intervalos de tiempo menor, lo que indica que el día duraba menos, sólo 5 o 6 horas. La rotación terrestre está continuamente frenando, ya que la deformación producto de la fuerza de marea, en continuo movimiento a través de la superficie terrestre, le estará quitando energía de la rotación. Producto que la Tierra es más masiva que la Luna, la disminución de la velocidad de rotación terrestre, o equivalentemente el aumento de la duración de un día, es mucho más lento que el lunar. La duración de un día en la Tierra está aumentando en el presente alrededor de 0.001 segundo por siglo.

Pero las fuerzas de marea producen otro efecto, a medida que la Tierra rota, el desplazamiento de las deformaciones por la superficie son en parte aminoradas por la fricción, lo que la desalinea levemente con la posición de la Luna (figura 3.17).

Esta desalineación ejerce un torque[12] sobre la Luna, acelerándola y haciendo que su órbita no sea cerrada sino que una espiral, alejándose progresivamente a una tasa de 3,85 [cm] por año. Los modelos de la formación lunar indican que cuando esta se formó, estaba a un décimo de su distancia actual. Las mareas oceánicas en la Tierra deben haber sido

[12]Torque es una fuerza de rotación y es igual al producto de la componente normal de la fuerza por el radio de giro.

al menos mil veces mayores que su tamaño actual. El clima provocado por tales enormes mareas debe haber tenido un profundo efecto en la evolución de la superficie terrestre y quizás haya influido en el origen de la vida sobre la Tierra.

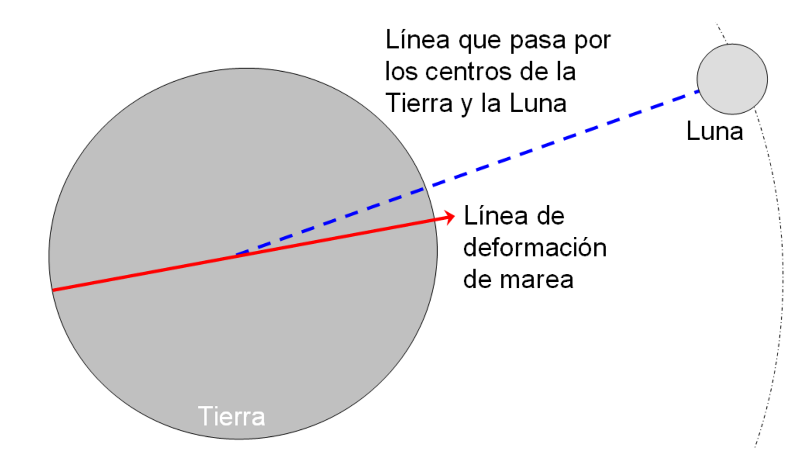


Figura 3.17: Desfase de las deformaciones de marea de la superficie terrestre respecto de la posición de la Luna.

3.3. Bibliografía del Capítulo

- *Cosmos, la serie de TV*. Carl Sagan Productions, Inc. 1980.
  - Capítulo 3: La Armonía de los Mundos.
- *El Carácter de las Leyes Físicas*. R. Feynman. Editorial Universitaria. 1973.
  - Capítulo 2: La relación de las matemáticas con la Física.
- *Teorías del Universo. Vol. I: De los pitagóricos a Galileo*. A. Rioja y J. Ordóñez, Editorial Sintesis. Segunda edición 2004.
- *Historia de la Ciencia*. J. Gribbin, Editorial Crítica. 2005.
  - Capítulo 2: Los últimos místicos.
- Swinburne Astronomy Online: http://astronomy.swin.edu.au/sao/
  - The Universal Force of Gravity.
  - Time and Tide.
- *Philosophiænaturalis principia mathematica*. Isaac Newton 1723. Obra original (en latín) disponible en Google books:

  http://books.google.com/books?id=JFM_AAAAcAAJ&pg=PP1#v=onepage&q=&f=false
- *De mundi systemate liber Isaacci Newton*. Isaac Newton 1728. Obra original (en latín) disponible en Google books:

  http://books.google.com/books?id=e44_AAAAcAAJ&pg=PP1#v=onepage&q=&f=false

Parte II

Apéndices

Apéndice A

Glosario

Aceleración: Rapidez de cambio de la velocidad de un cuerpo.

Agujero negro: Región finita del espacio-tiempo encerrada por una superficie, llamada horizonte de eventos o de sucesos, y de cuyo interior no puede escapar ninguna señal, incluyendo la luz. Dicho horizonte separa la zona interna, denominada agujero negro, del resto del Universo, debido a que limita el espacio a partir de la cual ninguna partícula puede salir.

Átomo: Del griego *άτομον* (indivisible), es la unidad más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos.

Big-Bang: Evento desde el cual comienza la expansión del Universo desde una singularidad primigenia o primordial.

Big-Crunch: Singularidad al término de la contracción del Universo.

Campo magnético: Es el responsable de las fuerzas magnéticas, producido por el movimiento relativo de cargas o por variaciones del campo eléctrico de estas. Junto con el campo eléctrico forman el campo electromagnético.

Carga eléctrica: Propiedad de una partícula por la cual puede repeler o atraer a otras partículas que tengan carga del mismo signo u opuesto.

Cero absoluto: Temperatura más baja de la naturaleza, en la cual un cuerpo o sistema de partículas no contendría energía térmica.

Cono de luz: Superficie en el espacio-tiempo que marca las posibles direcciones para los rayos de luz que pasan por un suceso dado.

Conservación de la energía: Ley de la naturaleza que explica que la energía o su equivalente en masa no puede ser creada ni destruida.

Constante cosmológica: Recurso matemático introducido por Einstein para dar al espacio-tiempo una tendencia inherente a no expandirse ni contraerse. En la actualidad la Constante Cosmológica parece ser más que eso, pues estaría asociada a una energía, llamada oscura, que produce a gran escala una aceleración de la expansión del Universo.

Coordenadas: Números que especifican la posición de un punto en el espacio y el tiempo.

Cosmología: Estudio del Universo como un todo.

Cuanto: Unidad indivisible en que las ondas electromagnéticas pueden ser emitidas o absorbidas.

Desplazamiento o corrimiento hacia el rojo: Incremento en la longitud de onda de la radiación electromagnética recibida comparada con la longitud de onda emitida por la fuente o su equivalente en el laboratorio. En el caso partícular de la astronomía o astrofísica, las líneas espectrales de la radiación de una estrella se desplazan producto del alejamiento de nosotros precisamente hacia el rojo del espectro electromagnético, esto se debe al efecto Doppler. Si la naturaleza del desplazamiento es de tipo "*cosmológica*", se debe a la expansión del espacio-tiempo y no debido al efecto Doppler, pues en este caso no existe movimiento relativo.

Decaimiento radiactivo: Fenómeno natural, por el cual algunas sustancias o elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad se las suele denominar radiaciones ionizantes. Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas en forma de rayos X o rayos gamma, o bien partículas, como pueden ser núcleos de Helio, electrones o positrones, protones u otras.

Dimensión espacial: Cualquiera de las tres dimensiones del espacio-tiempo, excepto la dimensión temporal.

Dualidad onda/partícula: En mecánica cuántica, concepto de que las partículas pueden a veces comportarse como ondas, y las ondas como partículas. Por lo cual no hay distinción entre ondas y partículas antes de realizar un experimento.

Electrón: Del griego $\varepsilon\lambda\varepsilon\kappa\tau\rho\nu$ (ámbar), es una partícula subatómica con carga eléctrica negativa. En un átomo los electrones rodean el núcleo, que está compuesto únicamente de protones y neutrones.

Espacio-tiempo: El espacio de cuatro dimensiones, tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal, cuyos puntos son los llamados eventos o sucesos.

Espectro: Distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía, la frecuencia o la masa. También recibe este nombre la representación gráfica de cualquiera de estas distribuciones.

Espín (spin): Propiedad intrínseca de las partículas elementales, que puede ser asociada con, pero no idéntica al concepto ordinario de giro.

Fotón: Un cuanto de radiación electromagnética, como caso particular un cuanto de luz.

Frecuencia: Para una onda, número de ciclos por unidad de tiempo.

Fusión nuclear: proceso en el que dos núcleos chocan y se funden para formar un único núcleo, más masivo.

Horizonte de eventos o sucesos: Superficie cerrada que es la frontera de un agujero negro. En el interior del horizonte, la velocidad de escape es mayor a la velocidad de la luz, por lo que, cualquier partícula dentro de él, incluyendo a los fotones, no pueden escapar debido al extremadamente intenso campo gravitacional. Las partículas del exterior que "caen" dentro de esta región nunca vuelven a salir.

Interacción (o fuerza) electromagnética: La segunda más fuerte de las cuatro fuerzas fundamentales, y junto a la gravedad son fuerzas de largo alcance. Afecta a las partículas con carga eléctrica.

Interacción (o fuerza) nuclear débil: La segunda más débil de las cuatro fuerzas fundamentales, con un alcance muy corto. Afecta a todas las partículas materiales, pero no a las partículas "portadoras de fuerzas".

Interacción (o fuerza) nuclear fuerte: La más fuerte de las cuatro fuerzas fundamentales y la que tiene el menor alcance de todas. Mantiene juntos a los quarks dentro de los protones y los neutrones, y une los protones y los neutrones para formar el núcleo del átomo.

Isótopo radiactivo: Se caracteriza por tener un núcleo atómico inestable, es decir, tienen un tiempo de decaimiento pequeño. Al decaer a una forma más estable emite energía.

Isótopos estables: Átomos que tienen el mismo número atómico, pero diferente número másico. Su estabilidad se debe al hecho de que, aunque son radiactivos, tienen un tiempo de decaimiento extremadamente largo, aún comparado con la edad de la Tierra.

Límite de Chandrasekhar: Límite de masa más allá del cual la degeneración de electrones no es capaz de contrarrestar la fuerza de gravedad en un remanente estelar, produciéndose un colapso; dando origen a una estrella de neutrones o a un agujero negro. Este límite equivale a aproximadamente 1,44 masas solares, y es la masa máxima posible de una enana blanca.

Longitud de onda: En una onda, distancia entre dos valles o dos crestas adyacentes.

Masa: Magnitud física fundamental, definida en la mecánica newtoniana como la cuantificación de la inercia o resistencia a la aceleración. Por otra parte en la teoría de la gravitación universal la masa tiene otro rol; es la propiedad que "genera" y "hace a un cuerpo sentir" la fuerza gravitacional. En la teoría de la relatividad especial, la masa es proporcional a la energía intríseca del cuerpo, conocida como energía del reposo: $E = mc^2$.

Mecánica cuántica: Teoría física que estudia el comportamiento de la materia a nivel microscópico. Fue desarrollada a partir del principio cuántico de Plank y del principio de incertidumbre de Heisenberg.

Neutrón: Partícula muy similar al protón pero sin carga, que se encuentra principalmente en el núcleo de la mayoría de los átomos.

Núcleo atómico: Parte central del átomo, que consta sólo de protones y neutrones, mantenidos juntos por la interacción fuerte.

Número atómico*:* Número que indica para cierto elemento la cantidad de protones contenidos en el núcleo del átomo, se representa por la letra Z y se escribe en la parte inferior izquierda del símbolo químico. Es el que distingue a un elemento químico de otro.

Número másico: Número total de nucleones que contiene un átomo, representado por la letra A y se escribe en la parte superior izquierda del símbolo químico. Para átomos con un mismo número atómico, distingue a un isótopo de otro.

Partícula elemental: Partícula que se cree que no puede ser subdividida ni se conoce que tenga estructura interna.

Partícula virtual: En mecánica cuántica, partícula que no puede ser nunca detectada directamente, pero cuya existencia sí tiene efectos medibles.

Peso: La fuerza ejercida sobre un cuerpo por un campo gravitatorio. Es proporcional, pero no igual, a su masa.

Positrón: Denominado también antielectrón, es una partícula cuya única diferencia con el electrón es que el signo de la carga eléctrica es positiva.

Protón: Cada una de las partículas cargadas positivamente en el núcleo del átomo.

Quark: Partícula elemental (cargada) que siente la interacción fuerte. Protones y neutrones están compuestos cada uno por tres quarks.

Radiación de fondo de microondas: Radiación electromagnética descubierta en 1965 que llena el Universo por completo. Procedente del brillo del caliente Universo primigenio, en la actualidad está tan fuertemente desplazada hacia el rojo, que no aparece como luz sino como microondas.

Radiactividad: Descomposición espontánea de un tipo de núcleo atómico en otro.

Rayo Gamma: Onda electromagnética de longitud de onda muy corta, producidas en la desintegración radiactiva o por colisiones de partículas elementales.

Relatividad especial: Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores que se mueven libremente y que la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, no importa cual sea el estado de movimiento del observador o la fuente emisora de la luz.

Relatividad General: Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores, no importa como se estén moviendo. Explica la fuerza de gravedad en términos de la curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

Segundo-luz (año-luz): Distancia recorrida por la luz en un segundo (un año).

Semivida o período de semidesintegración: Intervalo de tiempo que transcurre hasta que la cantidad de núcleos radiactivos de un isótopo radiactivo se reduce a la mitad de la cantidad inicial.

Singularidad: Un punto que no pertenece al espacio-tiempo, debido a que su curvatura es infinita.

Suceso o evento: Un punto en el espacio-tiempo, especificado por su tiempo y su posición espacial.

Teoría de Campo unificado: Teoría desconocida, que unifica las fuerzas electromagnéticas, fuerte, débil y gravitacional.

Otros glosarios:

Un completo glosario on-line, con definiciones de unos trescientos términos listados alfabéticamente, elaborado por iniciativa de la Sociedad Española de Astronomía (SEA) en colaboración con el diario El País digital, se encuentra disponible en la siguiente dirección:

http://www.elpais.com/especial/astronomia/glosario.html

Apéndice B

Constelaciones

Abreviatura	Castellano	Latín	
		Nominativo	Genitivo
And	Andrómeda	Andromeda	Andromedae
Aql	Águila	Aquila	Aquilae
Ari	Aries	Aries	Arietis
Aur	Cochero	Auriga	Aurigae
Boo	Boyero	Boötes	Boötis
Cnc	Cáncer	Cancer	Cancri
CVn	Lebreles	Canes Venatici	Cantan Venaticorum
CMi	Can Menor	Canis Minor	Canis Minoris
Cara	Jirafa	Camelopardalis	Camelopardalis
Cas	Casiopea	Cassiopeia	Cassiopeiae
Cep	Cefeo	Cepheus	Cephei
Com	Cabellera de Berenice	Coma Berenices	Comae Berenices
CrB	Corona Boreal	Corona Borealis	Coronae Borealis
Cyg	Cisne	Cygnus	Cygni
Del	Delfín	Delphinus	Delphini
Dra	Dragón	Draco	Draconis
Equ	Potro	Equuleus	Equulei
Gem	Gemelos	Gemini	Geminorum
Her	Hércules	Hercules	Herculis
Lac	Lagarto	Lacerta	Lacertae
Leo	Leo/León	Leo	Leonis
LMi	León menor	Leo Minor	Leonis Minoris
Lyn	Lince	Lynx	Lyncis
Lyr	Lira	Lyra	Lyrae
Oph	Ofiuco/Serpentario	Ophiuchus	Ophiuchi
Peg	Pegaso	Pegasus	Pegasi
Per	Perseo	Perseus	Persei
Psc	Piscis/Peces	Pisces	Piscium
Sge	Flecha	Sagitta	Sagittae
Ser	Serpiente (cabeza de)	Serpens Caput	Serpentis
Set	Escudo	Scutum	Scuti
Tau	Tauro	Taurus	Tauri

Tabla B.1: Constelaciones del hemisferio boreal.

Abreviatura	Castellano	Latín	
		Nominativo	Genitivo
Tri	Triángulo	Triangulum	Trianguli
UMa	Osa Mayor	Ursa Major	Ursae Majoris
UMi	Osa Menor	Ursa Minor	Ursae Minoris
Vul	Vulpeja/Zorra/Raposa	Vulpecula	Vulpeculae

Tabla B.2: Constelaciones del hemisferio boreal (continuación).

Abreviatura	Castellano	Latín	
		Nominativo	Genitivo
Ant	Máquina neumática	Antlia	Antliae
Aps	Ave del Paraíso	Apus	Apodis
Aqr	Acuario/Aguador	Aquarius	Aquarii
Ara	Altar	Ara	Area
Cae	Buril	Caelum	Caeli
CMa	Can Mayor	Canis Major	Canis Majoris
Cap	Capricornio	Capricornus	Capricorni
Car	Quilla	Carina	Carinae
Cen	Centauro	Centaurus	Centauri
Cet	Ballena	Cetus	Ceti
Cha	Camaleón	Chamaeleon	Chamaeleonis
Cir	Compás	Circinus	Circini
Col	Paloma	Columba	Columbae
CrA	Corona Austral	Corona Australis	Coronae Australis
Crv	Cuervo	Corvus	Corvi
Crt	Copa	Crater	Crateris
Cru	Cruz del Sur	Crux	Crucis
Dor	Pez Dorado	Dorado	Doradus
Eri	Erídano	Eridanus	Eridani
For	Horno	Fornax	Fornacis
Gru	Grulla	Grus	Gruis
Hor	Reloj	Horologium	Horologii
Hya	Hidra hembra	Hydra	Hydrae
Hyi	Hidra macho	Hydrus	Hydri
Ind	Indio	Indus	Indi
Lep	Liebre	Lepus	Leporis
Lib	Libra	Libra	Libras
Lup	Lobo	Lupus	Lupi
Men	Mesa	Mensa	Mensae
Mic	Microscopio	Microscopium	Microscopii
Mon	Unicornio	Monoceros	Monocerotis
Mus	Mosca	Musca	Muscae
Nor	Regla	Norma	Normae
Oct	Octante	Octans	Octantis
Ori	Orión	Orion	Orionis

Tabla B.3: Constelaciones del hemisferio austral.

Abreviatura	Castellano	Latín	
		Nominativo	Genitivo
Pav	Pavo	Pavo	Pavonis
Phe	Fénix	Phoenix	Phoenicis
Pic	Caballete del Pintor	Pictor	Pictoris
PsA	Pez austral	Piscis Austrinus	Piscis Austrini
Pup	Popa	Puppis	Puppis
Pyx	Brújula	Pyxis	Pyxidis
Ret	Red	Reticulum	Reticuli
Sgr	Sagitario	Sagittarius	Sagittari
Sco	Escorpión	Scorpius	Scorpii
Ser	Serpiente (cola de)	Serpens Cauda	Serpentis
Scl	Escultor	Sculptor	Sculptoris
Sex	Sextante	Sextans	Sextantis
Tel	Telescopio	Telescopium	Telescopii
TrA	Triángulo austral	Triangulum Australe	Trianguli Australis
Tuc	Tucán	Tucana	Tucanae
Vel	Vela	Vela	Velorum
Vir	Virgo/Virgen	Virgo	Virginis
Vol	Pez volador	Volans	Volantis

Tabla B.4: Constelaciones del hemisferio austral (continuación).

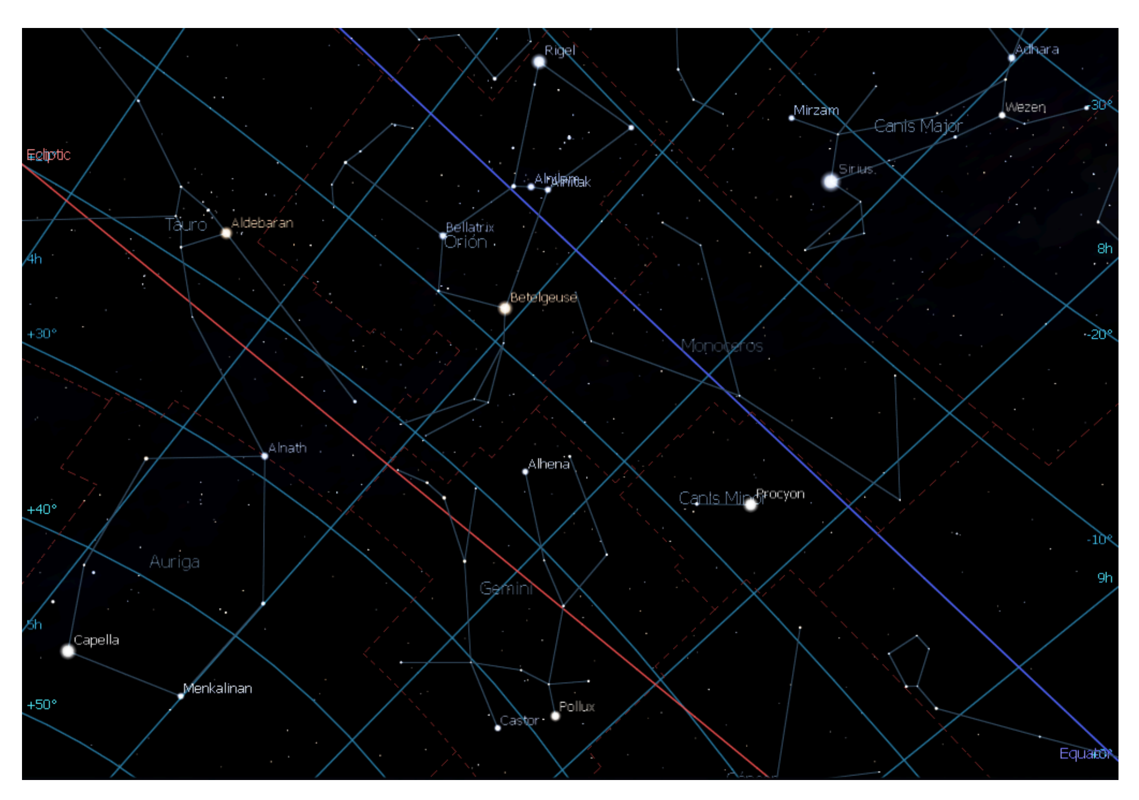


Figura B.1: Región del cielo que contiene la constelación de Orión tal como se observa desde la zona central de Chile y latitudes similares (Buenos Aires, Mendoza, Montevideo, etc). Observe como las constelaciones se ven invertidas respecto del hemisferio Norte. Imagen simulada con el Software Stellarium.

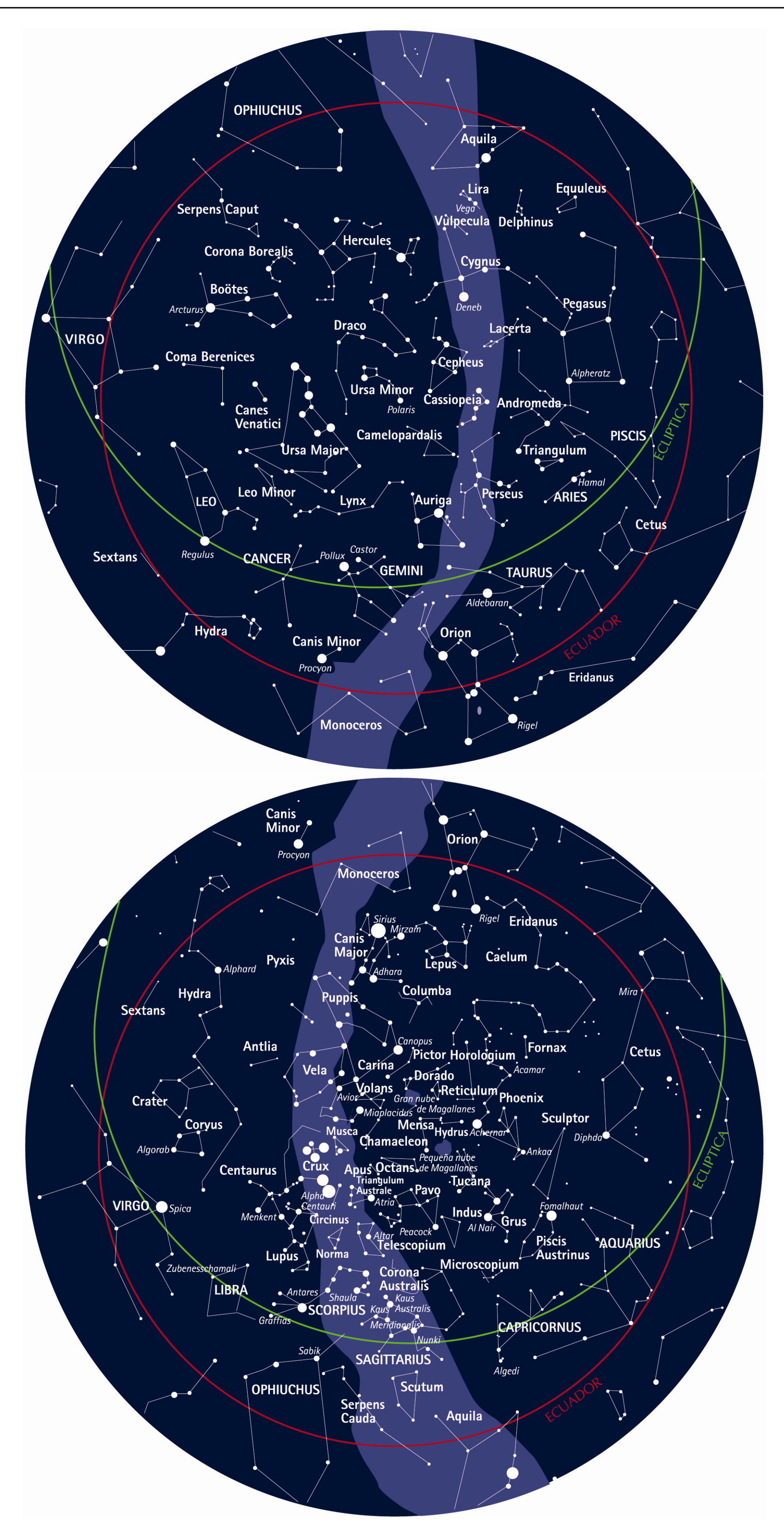


Figura B.2: Mapas celestes del hemisferio Norte (arriba) y del hemisferio Sur (abajo), están además representados el Ecuador y la Eclíptica.

Apéndice C

Modelos del Mundo

Entendemos como "*el mundo*" al conjunto de todas las cosas existentes. La cultura helénica generó durante varios siglos diferentes modelos del mundo, pero a diferencia de sus predecesores, no buscaron un origen divino o sobrenatural a los fenómenos de la naturaleza, produciendo diversas corrientes de pensamiento asociados a dichos modelos y su forma de ver el mundo. Fenómenos como las estaciones y el movimiento de los planetas intrigaron profundamente a los helénicos.

Filósofos, físicos y astrónomos se encargaron de buscar modelos. Según Platón, el astrónomo es el encargado de generar hipótesis que permitan reproducir las observaciones, y el físico es quien tiene la autoridad de decir si éstas son conformes con la realidad, aunque en la mayoría de los casos los físicos, no pronunciaban ningún juicio debido a que los principios afirmados eran muy generales.

Varios de estos modelos fueron de gran influencia durante la antigüedad y la Edad Media. Incluso en algunos casos algunas ideas han permanecido hasta la actualidad. Otras tantas han sido revividas y/o modificadas, ejemplo de éstas, son el modelo aristotélico, ptolemaico y el modelo de Aristarco. Estas ideas fueron transmitidas a otras civilizaciones occidentales principalmente por las conquistas de Alejandro Magno y gracias al Imperio Romano. La sobrevivencia de varios de éstos modelos en el mundo occidental, se debió a la adopción del algunos de ellos por el cristianismo, convirtiéndose algunos de éstos en dogmas, retrasando durante varios siglos el avance en el desarrollo de nuevos modelos. Además contribuyeron sistemáticamente a la eliminación de la antigua cultura grecorromana. Afortunadamente la ocupación de Constantinopla y Grecia por los turcos otomanos permitió la conservación de una parte importante del conocimiento antiguo que regresaría a occidente a fines de la Edad Media siendo uno de los factores importantes del Renacimiento científico.

A continuación nos referiremos a algunos de los modelos más importantes desde el punto de vista astronómico.

C.1. Modelo Pitagórico

Pitágoras de Samos (580 - 500 a. de C.) fundó la Escuela de Trotona cerca del año 530 a. de C., y debido a que ni él ni sus discípulos inmediatos dejaron documentos escritos, no se sabe con certeza que cosas correspondieron a legados del maestro o de los discípulos.

Pitágoras afirmó que todo en la naturaleza está gobernado por relaciones numéricas, por ejemplo, los movimientos celestes se efectúan con regularidad, los sonidos agradables

al oído, provenientes de las cuerdas de un instrumento musical, que según la tradición él mismo descubrió, corresponden exactamente a divisiones de éstas por números enteros.

La idea que los números rigen el Universo, les llevó a pensar que los diferentes planetas[1] formaban parte de un heptacordo que produce distintos tonos en un gran concierto celestial que nuestros oídos son incapaces de distinguirlos del silencio debido a que lo hemos escuchado siempre, así este sonido imperceptible para los comunes mortales no lo era para Pitágoras, ya que se decía que el sí era capaz en ocasiones de escuchar la música celestial.

Dentro de las ideas místicas que desarrollaron los pitagóricos, y que perduraría a través de los siglos, está la creencia de que la esfera es el más perfecto de todos los sólidos, de forma que asumieron la esfericidad de todos los astros y la Tierra, admitiendo también la idea de que las órbitas debían ser circulares, ya que el círculo es la más perfecta de las figuras. Otra de estas ideas místicas, fue la del número diez, lo que surge gracias a algunas características particulares como que es igual a la suma de los cuatro primeros números enteros ($10 = 1 + 2 + 3 + 4$), y se puede representar por un triángulo equilátero, llamado *tetraktys*, hecho con diez puntos arreglados en cuatro filas: un, dos, tres, y cuatro puntos en cada fila, cada uno de sus lados se forma por cuatro puntos.

Según los pitagóricos, estas características particulares del número 10 le otorgaban un lugar privilegiado en el Universo. Inspirado por esto, *Filolao de Táras o Crotona* (450 - 400 a. de C.) construyó un sistema "Pitagórico" del Universo. Sus ideas cosmogónicas[2] proponían que al principio el fuego lo llenaba todo el mundo, y que en un cierto instante, operó en el cosmos[3] un torbellino que separó al fuego, produciendo una diferenciación, parte del fuego quedó en el centro y el resto en el exterior. Entre ambos fuegos (el central y exterior) se encontraban nueve planetas; la Tierra, un planeta invisible denominado "Antitierra", los siete conocidos más la esfera de las estrellas fijas. Alrededor del fuego central giraban los nueve cuerpos celestes. El Sol giraba en torno al fuego central en un año, la Luna lo hacía en un mes, mientras que la Tierra tomaba sólo 24 horas para hacerlo.

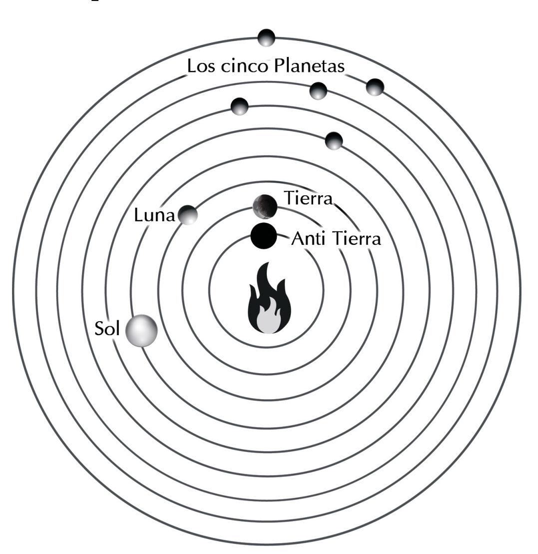


Figura C.1: Esquema cósmico de Filolao: La Tierra, una Antitierra, la Luna, el Sol y los cinco planetas se movían en órbitas circulares en torno al fuego Central. Más allá del último planeta (no representado aquí) se hallaba la esfera de las estrellas fijas que era contenida por el fuego exterior.

El Sol reflejaba la luz y el calor generados por el fuego central, ya que el fuego central junto con el fuego exterior (evidenciado a través de la Vía Láctea) eran la única fuente de luz y calor del Universo.

Filolao justificaba la no observación de la "Antitierra" por el hecho que la Tierra da siempre al fuego central el hemisferio deshabitado y la "Antitierra" está siempre interpuesta entre la Tierra y el Fuego Central, quedando así invisible.

[1]Planeta, quiere decir errante, en ese contexto son siete los Planetas, los cinco planetas visibles junto al Sol y la Luna.

[2]La cosmogonía (del griego $\kappa o\sigma\mu o\gamma o\nu\acute{\iota}\alpha$) es un relato mítico relativo a los orígenes del mundo.

[3]Cosmos (del griego $\kappa\acute{o}\sigma\mu o\varsigma$) es una palabra griega que significa el orden del Universo.

C.2. Modelo Homocéntrico

Aristocles de Atenas (428 - 348 a. de C.), más conocido por su apodo "*Platón*" consideró un Universo (el cosmos platónico) geocéntrico. La Tierra era esférica y completamente inmóvil. Alrededor de ella giraban la Luna, el Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter, Saturno y la esfera de las estrellas fijas, todos ellos desplazándose con movimientos circulares uniformes. Sus ideas cosmogónicas proponían que los astros fueron creados a partir del fuego y luego el *demiurgo*[4] los dotó de "alma". Por otra parte, la Vía Láctea era para Platón la zona de unión de las dos mitades de la bóveda celeste.

La idea sobre la circularidad, uniformidad y constante regularidad de los movimientos planetarios planteada con anterioridad por los pitagóricos, fue considerada por Platón, dándole validez en tal forma que habría de convertirse en dogma por cerca de 2000 años.

Algo muy importante que heredamos de Platón, fue asignar a la astronomía con toda claridad su misión: "*encontrar movimientos circulares, uniformes y perfectamente regulares que permitan representar los movimientos aparentes, complejos e irregulares de los planetas*".

Eudoxo de Cnido (408 - 355 a. de C.), discípulo de Platón, se propuso la tarea de representar los fenómenos celestes por un modelo geométrico que solamente pusiera en juego movimientos circulares y uniformes. Su modelo geocéntrico es conocido como Homocéntrico, debido a que utilizaba esferas concéntricas para explicar los movimientos planetarios.

El modelo consideraba varias esferas huecas e inobservables, contenidas unas dentro de otras, todas girando en torno a la Tierra con diferentes velocidades uniformes, y cuyos ejes de rotación tenían distintas orientaciones. Para explicar el movimiento de cada planeta debían existir al menos tres de estas esferas cuyo movimiento combinado explicaría el irregular movimiento observado de los planetas. Veamos como estaba construido el modelo homocéntrico: cada planeta se encontraba sujeto al ecuador de la esfera más externa, que llamaremos "C" (figura C.2) y que giraba uniformemente en torno a un eje que llamaremos "c". Dicho eje se encontraba sujeto a una esfera interior concéntrica que llamaremos "B" y cuyo eje de giro, que llamaremos "b", tenía diferente orientación que el de la esfera "C", y ambas giraban con distintas velocidades. El eje "b" se encontraba sujeto a otra esfera interior concéntrica que llamaremos "A", y que también giraba con velocidad y dirección "a" diferente de las de "B" y "C".

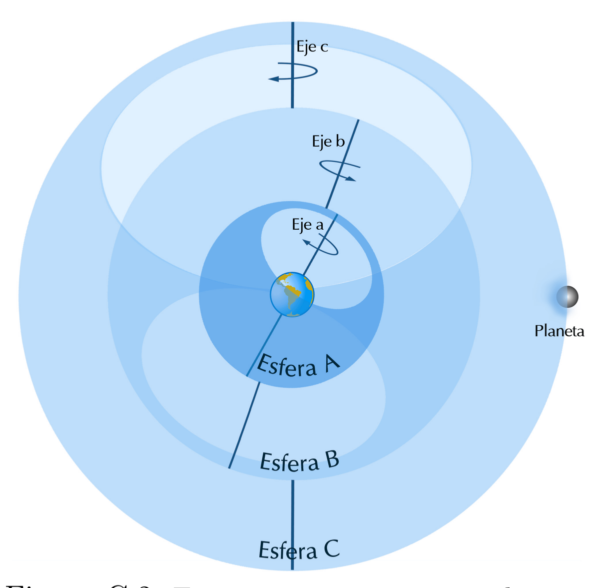


Figura C.2: Esquema que representa el movimiento de un planeta, en este caso la Luna, en el modelo de las esferas homocéntricas de Eudoxo.

Este modelo de tres esferas era válido para el Sol y la Luna, el resto de los planetas

[4]El demiurgo es la entidad que, sin ser necesariamente creadora, es impulsora del Universo. En la filosofía de Platón, también es considerado un dios creador del Mundo y hacedor del Universo.

tenían una cuarta esfera “D” que envolvía a las tres anteriores y cuyo eje de giro “d” también estaba orientado en una dirección distinta. Todos los planetas (incluyendo al Sol y la Luna) giraban de esa forma, ofreciendo un esquema geométrico extremadamente complicado. La ventaja era que ajustando apropiadamente las distintas velocidades de giro y las orientaciones de los ejes de rotación, daban cuenta de los irregulares movimientos observados.

Tal como hemos mencionado anteriormente Eudoxo introdujo en total veintisiete esferas homocéntricas: tres para la Luna, tres para el Sol, cuatro para cada uno de los restantes planetas, además de una esfera más externa que giraba entorno de un eje con orientación Norte-Sur, y era la que transportaba a las estrellas fijas.

C.3. Modelo Geoheliocéntrico

Ya desde el siglo IV a. de C. se había determinado que Mercurio y Venus se movían siempre en la cercanía del Sol, lo que no sucedía con los otros planetas. *Heráclides del Ponto* (390 - 339 a. de C.), desarrolló un modelo mixto que trataba de explicar dicho movimiento de Mercurio y Venus. El modelo consideraba los típicos movimientos planetarios en torno a la Tierra con la salvedad que consideró que Mercurio y Venus se movían alrededor del Sol. Además, en su modelo consideró la novedad que la Tierra no estaba inmóvil, sino que rotaba en torno a su propio eje una vez cada 24 horas.

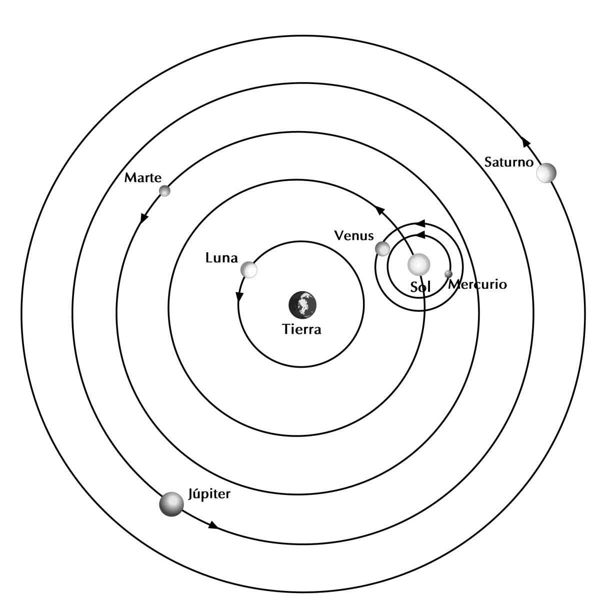


Figura C.3: El modelo de Heráclides consideró que Mercurio y Venus se movían alrededor del Sol y éste y el resto de los planetas en torno a la Tierra que a su vez rotaba en torno a su propio eje.

C.4. Modelo Aristotélico

Aristóteles de Estagira (384 - 322 a. de C.) preceptor de Alejandro Magno, fue el más grande sistematizador del saber antiguo. Fue una de las mentes más brillantes que ha producido la humanidad (comparable solo a la de Newton y Einstein) y con aportes en una vastedad de áreas del conocimiento (solo superada por Leonardo Da Vinci), debido a esto y lo convincente de sus argumentos, su modelo dominará por varios siglos, incluyendo las ideas que a posteriori se ha evidenciado que eran incorrectas.

El gran físico de la antigüedad, nos ha legado el concepto de $\varepsilon\pi\iota\sigma\tau\eta\mu\eta$ (conocimiento, todos los modos de saber), que después fue traducido por los romanos como *scientĭa* (ciencia), la que tenía como propósito primordial encontrar la naturaleza de las cosas. La física aristotélica pretende además explicar el por qué de los fenómenos (el por qué se mueven los cuerpos, el por qué caen, etc.).

La enciclopédica obra de Aristóteles abarcó la física, la lógica, la biología, las ciencias sociales y aquellas disciplinas que no se catalogaban dentro de las anteriores las sistematizó dentro de la metafísica.

El cosmos aristotélico adopta el sistema homocéntrico, la Tierra se encontraba inmóvil en el centro del Universo, la esfera de la Luna divide el cosmos en dos regiones totalmente diferentes: la *terrestre* o *sublunar* y la *celeste*. Más allá se hallaban las esferas del Sol y de los otros cinco planetas conocidos en la antigüedad, así como la que contenía a las estrellas fijas. El Universo no solo tenía forma esférica sino también era finito. A diferencia de sus predecesores, Aristóteles afirmó que las esferas homocéntricas no eran solo una representación geométrica sino que tenían naturaleza material sólida y transparente, introduciendo otro dogma que perduraría por casi 2000 años.

Aristóteles adopta además la doctrina empedocleana[5] de los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Estos elementos tenían una ubicación específica en la región sublunar, ordenándose capas esféricas concéntricas donde la terrestre era la más interna seguida por las capas de agua, aire y la exterior de fuego. Y si uno de estos elementos es apartado de este *lugar natural*, tiende a regresar a él de forma espontánea. A esto Aristóteles denominó *movimiento natural*. De acuerdo a lo anterior, los cuerpos pesados (los formados por tierra o agua) tenían un movimiento natural hacia abajo, debido a que su lugar natural estaba en el centro del mundo, mientras que los ligeros (los formados por aire o fuego) tenían un movimiento natural hacia arriba debido a que sus lugares naturales se encontraban en las esferas correspondientes que estaban más arriba.

La región terrestre o sublunar está compuesta por la Tierra y todo lo que se hallaba en su entorno, aquí se encontraban todos los objetos y ocurrían fenómenos sometidos a cualquier tipo de cambios y transformaciones, tales como el viento, las nubes, la lluvia, los truenos y relámpagos, los terremotos, los cometas e incluso la Vía Láctea, debido a que eran sucesos de carácter mutable y corruptible. En esta región, el estado natural de los cuerpos es el reposo, por ende se necesita que los cuerpos que se encuentren en movimiento estén siendo forzados a ello (movimiento violento), a modo de ejemplo, para explicar el movimiento de una flecha después que sale del arco, supone que es el mismo aire que se cierra tras de ella empujándola.

La región celeste o supralunar está caracterizada por ser perfecta e inmutable, allí se encuentran los cuerpos celestes. Estos objetos eran perfectos y siempre permanecían iguales a sí mismos y si mostraban cambios, estos eran cíclicos, como los movimientos planetarios o con las fases de la Luna, que se repetían indefinidamente. En esta región, los movimientos son eternos y en círculos, cuya causa es el denominado "*Primum Mobile*", un agente externo a la esfera de las estrellas fijas, y que imprimía movimiento a todo el cosmos.

Dado que la región celeste era de otra naturaleza, los cuerpos celestes no podían estar constituidos de fuego como indicaban las ideas platónicas, sino de un elemento más sutil, denominado "*quinta esencia*", o *éter*, dicho elemento es incorruptible y eterno, además dado que Aristóteles afirmaba que no podía existir el vacío, el cosmos también debía estar totalmente lleno de éter.

Su fundamentación a la inmovilidad de la Tierra era que si ella estuviese en movimiento una persona que salta, al caer debería hacerlo en un lugar diferente del cual ha saltado, debido a que la Tierra bajo él se habría movido.

Su afirmación de la esfericidad de la Tierra, estaba basada no sólo en razones de tipo geométricas o de perfección, sino porque ciertas observaciones sólo podían explicarse si el observador se hallaba sobre una superficie esférica. Entre estas observaciones destacan:

[5]Debida a Empédocles (492 - 435 a. de C.).

un observador parado en tierra firme ve un barco que se aleja en el horizonte desaparecer primero el casco, luego las velas y después los mástiles, o un observador que viaja en dirección Norte-Sur, ve que la elevación de las estrellas circumpolares cambia conforme se desplaza, apareciendo estrellas y constelaciones que no eran visibles desde su ubicación original.

De la misma forma, supuso que las estrellas eran esféricas, sin embargo, debido a la imperfección de la Vía Láctea (con contornos irregulares), no la considera como un cuerpo celeste y por ello la ubicó en la región sublunar, y consideró que se formaba por exhalaciones secas que ascendían desde la Tierra a la parte superior de la región sublunar, y que distorsionaban la luz de las estrellas cuando atravezaba las esferas de aire y de fuego. Los cometas se formarían de forma similar.

Sobre la finitud del Universo, era consecuencia lógica de que la Tierra fuese el centro, ya que para que algo tenga centro debe ser finito, pues lo infinito no puede tenerlo. Aseguró que el volumen que tenía la Tierra era infinitamente pequeño comparado con el que ocupa todo el cosmos.

Finalmente es de notar que en el siglo XIII, *San Tomás de Aquino* (1225 - 1274) estudió traducciones de los escritos originales griegos. En su magna obra *Summa Theologiæ* aceptó el empirismo aristotélico, su teoría hilemórfica[6] y la distinción entre dos clases de intelectos. De la filosofía árabe tomó la distinción (ajena a los griegos) entre la esencia y el ser (la existencia), a partir de la cual elaboró sus argumentos cosmológicos para demostrar la existencia de Dios: las cinco vías tomistas. De esta forma la Iglesia Católica hace suya la doctrina aristotélica, dejando de lado el platonismo como fundamento de la filosofía cristiana.

C.5. Modelo Heliocéntrico

Aristarco de Samos (310 - 230 a. de C.) cuestionó el modelo geocéntrico tradicional, posiblemente inspirado por el modelo híbrido de Heráclides del Ponto y en sus propios cálculos del tamaño del Sol. Planteó que el Sol era el centro del Universo y que los planetas giraban en circulos concéntricos en su entorno. Supuso que la Tierra gira en torno a su eje en 24 horas y además gira en torno del Sol en el curso de un año. Su modelo no fue aceptado y su doctrina cayó al olvido en el mundo occidental, a causa del modelo aristotélico, hasta 18 siglos después, cuando el astrónomo Polaco Nicolás Copérnico repone dicho modelo.

Si bien es cierto, su modelo explica de manera sencilla el movimiento retrógrado de los planetas, también predice que las estrellas debían tener cierto desplazamiento (paralaje) (ver Sección 2.9) al encontrarse la Tierra en diferentes lugares de su órbita, Aristarco supuso que no se observaban las paralajes porque la distancias a las estrellas eran muy grandes.

Otro de sus aportes fue estimar, apartir del tamaño de la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse lunar, la distancia de la Luna en términos del radio terrestre y determinó que ésta era tres veces más pequeña que la Tierra. Con menos éxito, estimó que el Sol se encuentra 19 veces más lejos que la Luna (en realidad 390 veces) y que es 7 veces más grande que la Tierra (en realidad 109 veces).

[6]Teoría aristotélica según la cual todos los seres sensibles o perceptibles (tanto los naturales como los artificiales) se componen de materia (hylé) y forma (morphé).

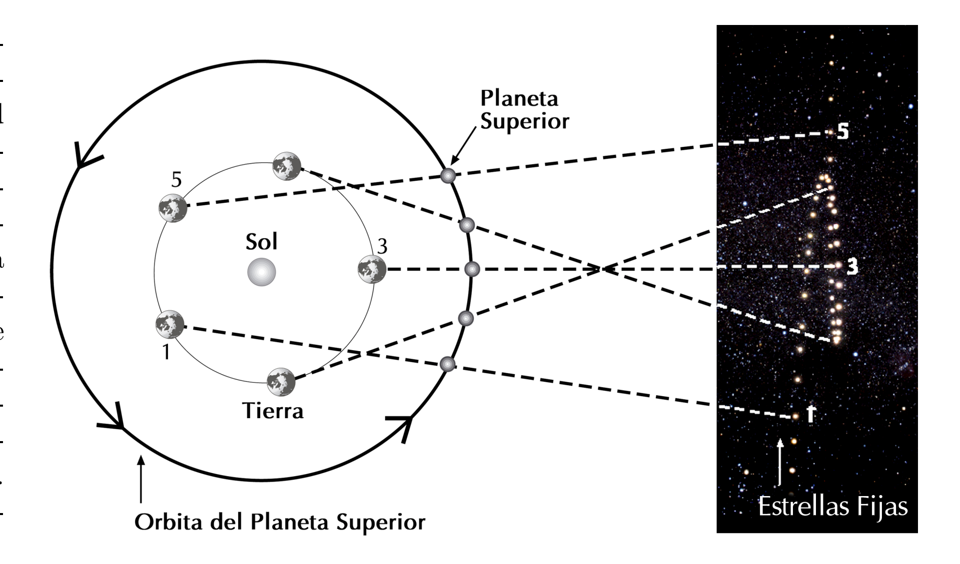


Figura C.4: El Modelo Heliocéntrico explica con simplicidad el movimiento retrógrado de planetas superiores (Marte, Júpiter y Saturno) sobre la esfera celeste. La figura es un montaje de la fotografía © de Tunç Tezel y una figura adaptada de Cosmos, la serie de TV. © Carl Sagan Productions, Inc.

C.6. Modelo Ptolemaico

Apolonio de Perga (247 - 205 a. de C.) realizó estudios geométricos sobre el problema del movimiento planetario. Quizás inspirado por el modelo mixto de Heráclides del Ponto, descubrió que dicho movimiento puede ser representado a través del movimiento de un planeta desplazándose en círculo que llamó *epiciclo* cuyo centro se desplaza sobre otro círculo mayor, al que denominó *deferente*. De esta forma, dió una sencilla explicación al problema de las retrogradaciones, al alejamiento y acercamiento cíclico de los planetas y al problema de las estaciones. Reduciendolos a un problema geométrico, y a establecer una combinación adecuada de dos movimientos circulares y uniformes.

La teoría de los epiciclos y las deferentes fue de gran importancia por varias razones, entre ellas que utilizaba combinaciones de moviminetos circulares y uniformes tan gratas a los pensadores helénicos, explicando el movimiento planetario sin tener que recurrir a órbitas excéntricas[7], además, gracias a ella se elaboró la teoría planetaria más importante y útil de la antigüedad.

Hiparco de Nicea (190 - 127 a. de C.), el astrónomo más grande de la antigüedad, no generó nuevos modelos, mas aportó otro legado respecto de éstos. Observó que dos modelos diferentes, podrían igualmente representar el irregular movimiento aparente del Sol. Así su movimiento aparente puede ser explicado, ya sea, a través de un círculo excéntrico respecto de la Tierra, o a través de un círculo epiciclo cuyo centro recorre un circulo concéntrico al centro de la Tierra en el mismo tiempo que tarda en recorrer el epiciclo. Aunque Hiparco fue astrónomo y no físico, consideró que solo la hipótesis del epiciclo debía ser correcta y que la del excéntrico concuerda sólo por accidente.

Años más tarde *Posidonio de Apamea* (135 - 51 a. de C) ante la equivalencia entre las hipótesis de los epiciclos y de los excéntricos para explicar los movimientos irregulares de los planetas, manifestó que también se podría encontrar equivalencia en la antigua idea de dejar fijo al Sol y móvil a la Tierra.

[7]En geometría un círculo excéntrico es aquel que está descentrado, o que tiene un centro diferente, en este caso, a la Tierra.

La física de aristóteles, a diferencia de la platónica, es incompatible con la teoría heliocéntrica y la de los epiciclos, pues el único movimiento natural debe ser una rotación uniforme en torno del centro del mundo. Sin embargo, Hiparco y posteriormente Ptolomeo no usaron la física de Aristóteles en sus hipótesis astronómicas. Hiparco tenía buenas razones para ello, pues elaborando su famoso catálogo estelar, y al comparar las coordenadas estelares con aquellas consignadas en antiguas fuentes caldeas y griegas, descubrió que no coincidían, habiendo experimentado por ende cambios importantes en sus posiciones y que no se podían atribuir a errores de observación, por lo que interpretó que *había ocurrido un cambio en la dirección del eje de rotación de la esfera celeste*, lo cual contradice la física de Aristóteles. Aunque ya Heráclides del Ponto había propuesto la rotación de la Tierra para explicar la rotación sideral de la esfera celeste, no existe evidencia que Hiparco haya interpretado dicha información como evidencia de la rotación terrestre.

Claudio Ptolomeo (90 - 168 d. de C.), quien vivió durante el siglo II estuvo a cargo de la biblioteca de Alejandría, fue uno de los científicos más importantes de la antigüedad. Su obra originalmente llevó el título de *Μαθηματική Σύνταξις* (*Mathematike Syntaxis* o Tratado de Matemáticas), después llamado *Η Μεγάλη Σύνταξις* (*Hè Megalè Syntaxis* o El Gran Tratado). En el siglo XII se encuentra en Toledo (actual España) una traducción al árabe de la obra de Ptolomeo publicada en 827 en Bagdad como "*Al-Majisti*" (El más grande) siendo publicada en castellano y posteriormente, en 1175, al Latín como *Almagesto*, nombre con el cual es conocido hasta la actualidad. El Almagesto está compuesto por 13 libros (capítulos). Una copia de la obra original fue encontrada en 1538 siendo la base de posteriores traducciones.

En el primer libro Ptolomeo expone un sistema geocéntrico del Universo el cual tuvo vigencia por más de 14 siglos. Inspirado en los trabajos de Apolonio e Hiparco, ideó un sistema donde los planetas se movían uniformemente en torno de la circunferencia de un epiciclo, cuyo centro se movía en torno de otra circunferencia de un círculo deferente. La trayectoria del planeta que se mueve a través del epiciclo y éste por el deferente es denominada *epicicloide* (figura C.5).

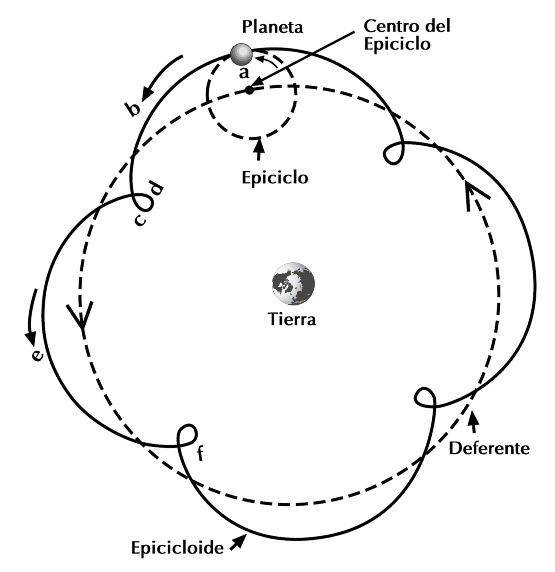


Figura C.5: El Planeta se desplaza en un círculo menor llamado epiciclo, cuyo centro se desplaza sobre otro círculo mayor llamado deferente. La trayectoria resultante es denominada epicicloide. Visto desde la Tierra, un planeta se mueve en forma directa entre los puntos "a" y "c", "d" y "f" y así sucesivamente y se mueve en forma retrógrada entre los puntos "c" y "d".

Todos los deferentes de los planetas son concéntricos al centro de la Tierra. Los planetas inferiores (ver Sección 2.6) tardan el mismo tiempo que el período sinódico en recorrer el epiciclo, y el centro de éstos tarda un año en recorrer el deferente. Ptolomeo hizo que el centro de sus epiciclos se encontraran siempre en la línea que pasa por el centro de la Tierra y del Sol, explicando de esta forma que estos planetas nunca se alejen mucho del Sol. Los planetas superiores en cambio, tardan un año en recorrer el epiciclo, y el centro de éstos tarda el mismo tiempo que el período sideral en recorrer el deferente. Estas combinaciones de períodos de revolución en torno del epiciclo y del deferente explican el

cambio aparente de brillo y la retrogradación de los planetas, y además también explica por qué estos planetas pueden tener elongaciones de cualquier valor (ver sección 2.6).

Una de las grandes ventajas del modelo de Ptolomeo es que el uso de epiciclos permite ajustar los epicicloides variando la razón de los radios del deferente y del epiciclo, así como la razón entre las velocidades relativas de uno y otro movimiento, por lo que es posible reproducir con buena exactitud las órbitas planetarias.

Aunque la teoría de los epiciclos contradice la física de Aristóteles, tuvo gran aceptación hasta buena parte del Renacimiento, debido principalmente a tres causas:

- Continúa usando movimientos circulares y uniformes.
- Ptolomeo reconoce que su modelo es un artificio geométrico que permite explicar en buena medida los movimientos de los planetas, mas no se debe creer que éstos sean en el cielo movimientos reales.
- Con el transcurso de los siglos, el aporte de nuevas observaciones permitió perfeccionarlo, llegando a convertirse en un modelo bastante exacto y por ende de gran utilidad.

Respecto del ordenamiento planetario, Ptolomeo ubicó, como era ya sabido desde la antigüedad, a la Luna como el cuerpo celeste más cercano a la Tierra. Luego de la Luna estaba Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno. Mucho más allá de todos ellos situó a la esfera de las estrellas fijas. Sin embargo, debido a que tanto Mercurio, Venus y el Sol poseen aproximadamente el mismo periodo sideral[8] no resulta completamente claro el orden que deberían tener. Este orden propuesto por Ptolomeo por ende no es absoluto.



Figura C.6: Orden planetario en el modelo de Ptolomeo.

En los restantes 12 libros estudió con gran rigurosidad matemática diversos temas astronómicos, entre los que destacan sus estudios sobre la forma y el lugar ocupado por la Tierra en el Universo, así como la distribución que los demás cuerpos celestes tienen en él, allí afirma que:

- El cielo es esférico y gira en torno a un eje que pasa por el centro de la Tierra.

[8]Ptolomeo consideró un año, pero este intervalo de tiempo no es completamente regular, por término medio es el tiempo empleado en recorrer el deferente.

- La Tierra es una esfera situada en el centro de la esfera celeste y puede considerarse como un punto cuando sus dimensiones se comparan con el radio del la esfera celeste.
- La Tierra no tiene ningún movimiento.
- Las estrellas fijas mantienen siempre su posiciones relativas entre sí.

Sobre la esfericidad de la Tierra se afirma en los siguientes hechos:

- Tanto el Sol, como la Luna y las otras estrellas no salen ni se ocultan simultáneamente para cualquier observador, sino que lo hacen primero para aquellos que están situados más al Este, y después para los que se localizan en el Oeste.
- Los eclipses, nunca son registrados a la misma hora por distintos observadores, esto es particularmente apreciable en los eclipses lunares. La registran primero los observan desde posiciones ubicados más al Oeste que aquellos ubicados más al Este. Las diferencias en los tiempos registrados por dichos observadores son proporcionales a las distancias que hay entre los lugares de observación.

Todo lo anterior solo nos puede llevar a concluir, dice Ptolomeo, que la superficie de la Tierra es esférica.

C.7. Bibliografía del Capítulo

- *Historia de las Ciencias*. Desiderio Papp. Editorial Andrés Bello. 1996.
- ΣΩZEIN TA ΦAINOMENA. *Ensayo Acerca de la Noción de Teoría Física de Platón a Galileo*. Pierre Duhem. 1908. Prólogo y versión castellana de Godofredo Iommi Amunátegui. Ediciones UVM. 2000.
    - Capítulo I: La Ciencia Helénica
- *La Morada Cósmica Del Hombre*. Marco Moreno. Fondo de Cultura Económica. 1997. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/155/htm/lamorada.htm
    - Capítulo III: Primeros Intentos de Racionalización
- *Teorías del Universo. Vol. I: De los pitagóricos a Galileo*. A. Rioja y J. Ordóñez, Editorial Sintesis. Segunda edición 2004.

Apéndice D

El Efecto Doppler

Cuando un medio es perturbado, por ejemplo una piedra que impacta el agua, la perturbación es capaz de propagarse. Denominamos *Onda*, a la propagación de una perturbación.



Figura D.1: (Izquierda) Una piedra impactando el agua es una perturbación.

Figura D.2: (Derecha) La perturbación se propaga a través del agua como ondas.

Podemos observar algunas características de las ondas producidas en el agua, la primera es que se propaga en círculos concéntricos, esto se debe a que el medio, en este caso el agua, es homogéneo, por ello la velocidad de propagación es la misma en cualquier dirección. Cualquier observador equidistante del punto de perturbación podrá observar la misma longitud de onda y la misma frecuencia.

Supongamos ahora que lanzamos a intervalos regulares varias piedras una al lado de la otra sobre una misma línea (figura D.3). Ubiquemos a dos observadores en ambos extremos de la fuente de agua, pero sobre la misma línea en la que caen las piedras.

¿Medirán la misma distancia entre las crestas de las ondas en el agua?

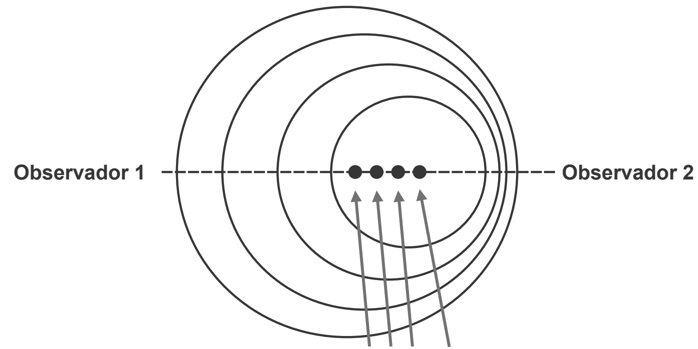


Figura D.3: Un observador y/o la fuente perturbadora en movimiento relativo.

Claramente no, el observador 1 medirá una mayor dis-

tancia entre las crestas y el observador 2 medirá una menor distancia entre las crestas, es decir, la longitud de onda medida por el observador 1 aumenta y la medida por el observador 2 disminuye.

Lo mismo ocurre con la frecuencia, el observador 1 observa que las ondas llegan con menor frecuencia y el observador 2 observa que las ondas llegan con mayor frecuencia.

Observe que ahora los círculos no son concéntricos, pues el lugar de perturbación se está desplazando, esto produce que distintos observadores midan distintas frecuencias y distintas longitudes de onda.

Al cambio de frecuencia y longitud de onda producto del movimientos de la fuente de ondas o del receptor se denomina *Efecto Doppler*, en honor de *Christian Doppler* (1803-1853).

D.1. El Efecto Doppler en Ondas de Sonido

Al igual que las ondas en el agua, las ondas sonoras se propagan en el espacio tridimensional, pero en vez de círculos tendremos ondas que se propagan de forma esférica, aunque se produce el mismo efecto tanto si la fuente sonora como el receptor se mueven.

El efecto Doppler en ondas sonoras se puede evidenciar al oír como cambia el tono de la sirena de una ambulancia, bomberos o la policía.

¿Recuerda la última vez que sintió la sirena de uno de estos vehículos?

Seguramente recordará que el tono que sintió cuando se acercaba cambió cuando se alejaba. Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras llegan al oído con mayor frecuencia cuando la fuente sonora se acerca y con menor frecuencia cuando se aleja.

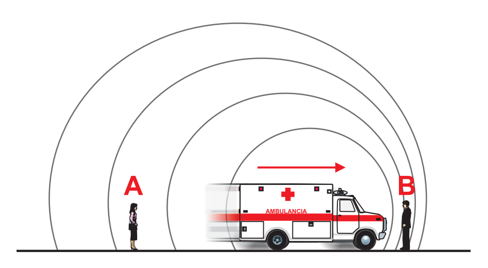


Figura D.4: Dos observadores oyen de manera distinta la sirena de una ambulancia que se aleja (izquierda) y se acerca (derecha).

D.2. El Efecto Doppler en Ondas Electromagnéticas

El efecto Doppler también aparece en las ondas electromagnéticas. La luz visible es un pequeño grupo de ondas electromagnéticas.

El efecto Doppler de ondas electromagnéticas es una herramienta fundamental en astronomía, ya que permite medir indirectamente velocidades de acercamiento o alejamiento de las fuentes de ondas luminosas, que en astronomía son cuerpos celestes.

El uso del efecto Doppler en astronomía se basa en el hecho que el espectro de radiación electromagnética no es continuo, las discontinuidades (líneas oscuras) son llamadas líneas espectrales de absorción (figura D.5).

Las líneas espectrales de absorción se caracterizan por la ausencia de radiación a una longitud de onda y frecuencia específica, y se producen por la absorción de esas ondas por átomos o moléculas que poseen los mismos cuerpos celestes que producen la radiación, o por átomos o moléculas que se encuentran en el espacio o en nuestra atmósfera. Por ejemplo si pudiéramos observar el espectro del ultravioleta que recibimos en la superficie

de la Tierra, evidenciaríamos líneas oscuras justo en la longitudes de onda que absorbe el ozono.

Si el cuerpo celeste emisor de radiación está en movimiento respecto de la Tierra, las líneas espectrales de absorción se desplazarán respecto de aquellas producidas por una fuente en reposo, desplazándose hacia el rojo o el azul dependiendo si el observador y la fuente (o uno de ellos) se alejan o acercan entre si.

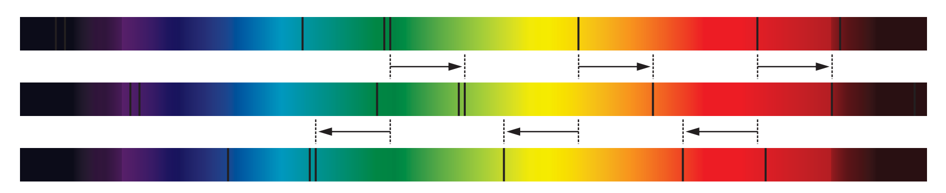


Figura D.5: Espectros visible con líneas de absorción (líneas oscuras). El espectro superior corresponde al espectro que se observa cuando el observador y la fuente están en reposo relativo. Cuando el observador y/o se alejan, las líneas de absorción se desplazan hacia el rojo (espectro central) y cuando se acercan, las líneas de absorción se desplazan hacia el azul (espectro inferior).

Epílogo

Este primer volumen de *Astronomía Elemental* comienza con un primer capítulo que describe en forma muy general como trabaja la ciencia astronómica dando un "barniz" de sus distintas áreas de estudio. Luego, en el segundo capítulo, se da un salto atrás en el tiempo para describir la astronomía ancentral y cultural, la astronomía que conocían los sabios antiguos, aquella que estaba vinculada con el quehacer humano, su cultura. Justamente la que hemos perdido desde el comienzo de la revolución industrial y la iluminación de las ciudades. El tercer capítulo muestra como la astronomía en el renacimiento se transforma en una ciencia propiamente tal, eliminando dogmas provenientes de la ciencia helénica y produciéndose una separación entre ciencia y religión.

Desde el punto de vista de la docencia, a esta primera parte, le he dedicado 2, 6 y 2 horas respectivamente a cada unidad (capítulo). Entre la segunda mitad de 2006 y la primera mitad de 2008, la asignatura fue impartida de forma presencial, y el segundo semestre de 2008 y 2009 la asignatura fue impartida en modalidad e-learning, utilizando la plataforma Moodle. Esto último me permitió afinar aún más las correcciones, extender aquellas secciones o subsecciones más difíciles de comprender, además la participación y las discusiones en los foros semanales fueron enriquecedores tanto para los estudiantes como para mi.

No es fácil enseñar ciencias, menos a estudiantes con una casi nula formación en ciencias básicas, primero porque existe una apatía generalizada a las ciencias físicas y a las matemáticas (sin considerar la cultura del mínimo esfuerzo), por ello, he procurado no utilizar cálculos complicados y minimizar al máximo el uso de ecuaciones, esto inevitablemente no permite ahondar mucho en la comprensión de las leyes naturales que rigen los fenómenos, pero por otra parte plantea el desafío de conseguir que el estudiante adquiera una idea cualitativa de ellas de forma tal que le permita entender los fenómenos de la naturaleza. Segundo, es difícil erradicar ideas preconcebidas acerca de como funciona realmente la ciencia. A favor de la enseñanza de la astronomía, a diferencia de la física, está la existencia de una cierta simpatía de la gente común por temas astronómicos, al punto que entiendo que es la única ciencia que cuenta con aficionados, algunos de los cuales hacen aportes reales a esta disciplina.

Espero que el texto haya cumplido todos sus objetivos, que sea material inspirador para las futuras generaciones, obra de consulta para profesores, aficionados, estudiantes y autodidactas en general.

En la segunda parte de esta obra, denominada "Astrofísica y Astrobiología" nos dedicaremos a revisar con más detalle las distintas áreas de la astronomía moderna explicadas en el capítulo 1.

Isaías Rojas Peña.
Madrid, marzo de 2010.

Imágenes usadas al inicio de capítulos:

Capítulo 2: *La noche estrellada* de Vincent van Gogh (1889).

Capítulo 3: El Grabado Flammarion, famosa ilustración aparecida en *L'Atmosphere: Météorologie Populaire* (Paris, 1888, pp. 163) del astrónomo y escritor Camille Flammarion la imagen representa el descubrimiento de la astronomía por el hombre.

Índice Alfabético